

# Weiterleitung von Horizontallasten durch Trapezprofile

**T 3268**

T 3268

Dieser Forschungsbericht wurde mit modernsten Hochleistungskopierern auf Einzelanfrage hergestellt.

Die in dieser Forschungsarbeit enthaltenen Darstellungen und Empfehlungen geben die fachlichen Auffassungen der Verfasser wieder. Diese werden hier unverändert wiedergegeben, sie geben nicht unbedingt die Meinung des Zuwendungsgebers oder des Herausgebers wieder.

Die Originalmanuskripte wurden reprotechnisch, jedoch nicht inhaltlich überarbeitet. Die Druckqualität hängt von der reprotechnischen Eignung des Originalmanuskriptes ab, das uns vom Autor bzw. von der Forschungsstelle zur Verfügung gestellt wurde.

© by Fraunhofer IRB Verlag

2012

ISBN 978-3-8167-8666-5

Vervielfältigung, auch auszugsweise,  
nur mit ausdrücklicher Zustimmung des Verlages.

**Fraunhofer IRB Verlag**

Fraunhofer-Informationszentrum Raum und Bau

Postfach 80 04 69

70504 Stuttgart

Nobelstraße 12

70569 Stuttgart

Telefon (07 11) 9 70 - 25 00

Telefax (07 11) 9 70 - 25 08

E-Mail [irb@irb.fraunhofer.de](mailto:irb@irb.fraunhofer.de)

[www.baufachinformation.de](http://www.baufachinformation.de)

## **BERICHT**

**Nr.: 081504**

### **Weiterleitung von Horizontallasten durch Trapezprofile**

Auftraggeber: Deutsches Institut für Bautechnik  
Kolonnenstraße 30L  
10829 Berlin

Grundlage: Vertrag vom 15.10.2008

Dieser Bericht umfasst 51 Seiten und 2 Anlagen (100 Seiten).

Ausgabedatum: 31.10.2011

## **Inhaltsverzeichnis**

1	Einleitung	3
2	Umfang der Untersuchungen	5
3	Versuche	6
4	Finite-Elemente-Berechnungen	7
5	Ausgangssituation	8
6	Trag- und Verformungsverhalten bei Lasteinleitung in Obergurtebene	9
6.1	Vorbemerkungen	9
6.2	Gesamtsystem	9
6.3	Auflager	27
7	Tragfähigkeit am Auflager	37
7.1	Vorbemerkungen	37
7.2	Querkräfte in den Verbindungen	37
7.3	Zugkräfte in den Verbindungen	39
7.4	Interaktion	40
7.5	Stegkrüppeln	40
7.6	Tragfähigkeit des Profilquerschnitt	41
8	Gebrauchstauglichkeit	43
8.1	Verdrehung	43
8.2	Querbiegung	46
9	Zusammenfassung	48
10	Schrifttum	51

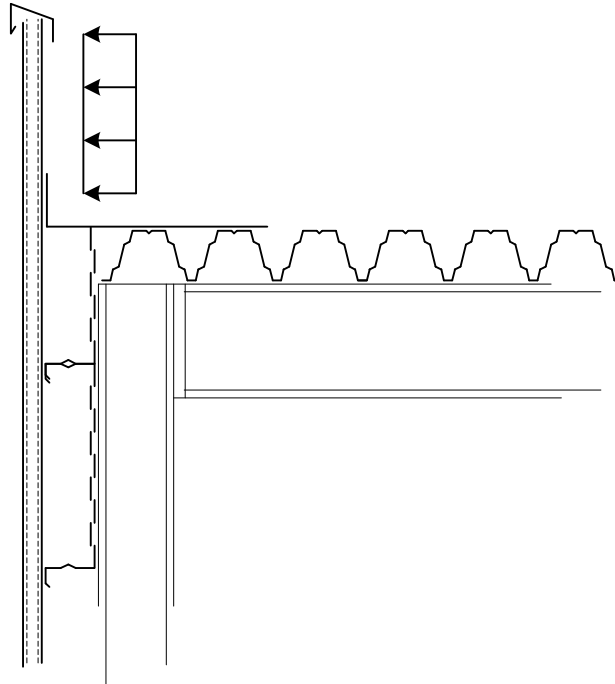
Anlage A: Versuche

Anlage B: Finite-Elemente-Berechnungen



## 1 Einleitung

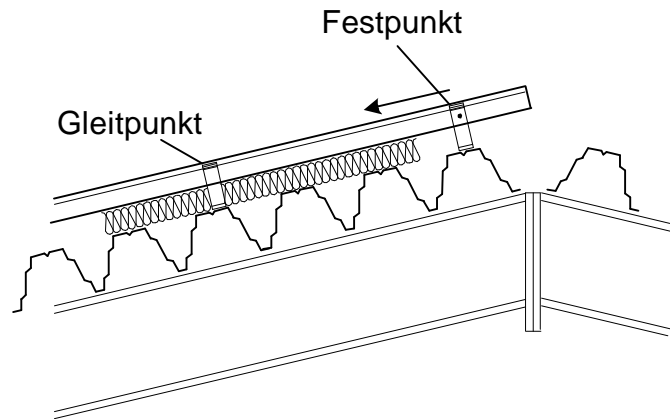
An einer Attika angreifende Windlasten erzeugen erhebliche Auflagerkräfte in der Höhe der Oberkante der Dacheindeckung aus Trapezprofilen. In der Regel ist aber gerade bei Kassettenwänden kein Wandriegel vorgesehen oder der Einbau einer vergleichbaren Auswechslung nicht möglich. Stattdessen bietet es sich an, die Horizontalkräfte durch gekantete Winkel in die Obergurte der angrenzenden Profilrippen einzuleiten.



**Abbildung 1: Attika mit Windbelastung**

Diese werden dadurch quer zur Spannrichtung durch eine Linienlast belastet. Diese Belastung ist mit der in einem Schubfeld vergleichbar, jedoch hat in diesem Fall die Lastabtragung von den Obergurten in die an der Unterkonstruktion befestigten Untergurte der Trapezprofile zu erfolgen, woraus sich eine Verdrehung der Rippen und damit Verschiebungen rechtwinklig zur Dachfläche ergeben. Des Weiteren fehlt die bei Schubfeldern vorausgesetzte umlaufende Befestigung.

Ein vergleichbares Problem ergibt sich beim Dachschub aus der Außenschale zweischaliger Dachkonstruktionen (Fixpunkt am Giebel), z.B. bei der Verwendung von Stehfalzprofilen, bei denen die Außenschale an diskreten Punkten an der Innenschale (Obergurte) befestigt ist. In diesem Fall ergeben sich zusätzliche Querbiegemomente.



**Abbildung 2: Festpunkt bei zweischaligem Dach mit Stehfalzprofileindeckung**

Diese Lasten in der Dachebene führen bei zweischaligen Dachaufbauten zu einer Belastung der innenliegenden Tragschale aus Trapezprofilen und zu einer Beanspruchung dieser Trapezprofile, für die es keinen abgesicherten Berechnungsansatz gibt.

Mit diesem Berechnungsansatz muss die Weiterleitung der Kräfte in die Unterkonstruktion nachgewiesen werden können. Die Belastung durch eine Einzellast sowie durch das damit verbundene Querbiegemoment kann darüber hinaus auch zu einer reduzierten Biegetragfähigkeit der Trapezprofile führen. Dies ist umso kritischer, als dass die betroffenen Trapezprofile und Rippen in den durch die auch auf die Attika wirkenden Windlasten am stärksten betroffenen Bereich liegen.

## **2 Umfang der Untersuchungen**

Im Rahmen dieses Forschungsprojektes wurden Versuche sowie Berechnungen mit der Methode der Finiten Elemente zur Ermittlung des Trag- und Verformungsverhaltens der Trapezprofile bei Einleitung von Horizontallasten durchgeführt.

In den Versuchen wurden ausgewählte Konfigurationen untersucht, um den Einfluss der Parameter Blechdicke, Profiltyp sowie Art und Richtung der Lasteinleitung zu zeigen. Insbesondere dienen diese Versuche der Ermittlung der maßgebenden Versagensmodi. Die Versuche sind im Anhang A dokumentiert. Die Finite-Elemente-Berechnungen dienen der Beurteilung und der qualitativen Beschreibung des globalen und lokalen (Verformungs-)Verhaltens in Abhängigkeit von unterschiedlichen Parametern. Die Finite-Elemente-Berechnungen sind im Anhang B dokumentiert.

Die für das Versagen im Versuch maßgebenden Effekte am Auflager lassen sich nicht mit vertretbarem Aufwand im Finite-Element-Modell modellieren. Um den Nachweis der Weiterleitung der Kräfte in die Unterkonstruktion zu ermöglichen, werden die Auflagerkräfte ermittelt, die dann den Widerständen gegen Stegkrüppeln und Versagen der Verbindung gegenübergestellt werden müssen. Auf diese Art und Weise kann beim Nachweis am Auflager die Interaktion mit den Auflagerkräften aus der Biegebeanspruchung der Trapezprofile berücksichtigt werden.

Zur Minimierung der Verformungen, insbesondere der Verdrehungen, werden konstruktive Mindestanforderungen erhoben.

### **3 Versuche**

Zur Untersuchung des globalen Verformungsverhaltens und zur Kalibrierung des Finite-Element-Modells wurden Bauteilversuche durchgeführt. In den Versuchen wurden zwei unterschiedliche Profilquerschnitte mit unterschiedlichen Blechdicken untersucht. Stützweite und Lasteinleitung wurden variiert: Es wurden die Belastungen WA („Windsog Attika“) und DS („Dachschub“) untersucht, letztere Belastung in Verbindung mit einem Hebelarm, der die bei der Einleitung des Dachschubs aus der Außenschale in die Tragschale anzutreffende Belastungssituation repräsentiert.

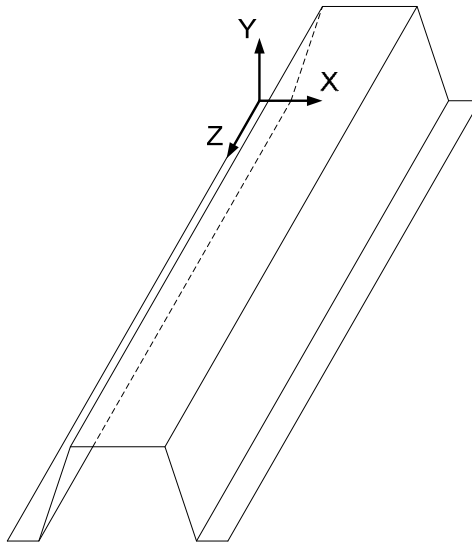
Die Durchführung der Versuche sowie deren Ergebnisse sind in Anlage A dokumentiert.

#### 4 Finite-Elemente-Berechnungen

Es wurden lineare Berechnungen zur Ermittlung der Auflagerkräfte und Verformungen durchgeführt. Die Durchführung der Finite-Element-Berechnungen wird in Anlage B erläutert.

Ergänzend wurden hinsichtlich Geometrie und Werkstoff nichtlineare Berechnungen durchgeführt, bei denen die Verbindung mit der Unterkonstruktion über Kontakt modelliert wurde. Auf diese Berechnungen wird im Folgenden nicht weiter eingegangen, da diese im Wesentlichen der Abgleichung des Berechnungsmodells mit den Versuchen dienen.

Im Folgenden werden für die Richtung von Beanspruchungen, Verschiebungen und Verdrehungen die Bezeichnungen gewählt, die sich aus dem Modell der Finite-Elemente-Berechnungen ergaben.



**Abbildung 3: Koordinatensystem**

## 5 Ausgangssituation

Die Normen der Reihe DIN 18807, aber auch andere Regelwerke, Veröffentlichungen etc. liefern keinen Berechnungsansatz zum Nachweis der Weiterleitung der aus horizontal auf den Längsrand einer Dachfläche einwirkenden Kräften. Die praktische Bemessung orientierte sich daher bisher an den Angaben in der Veröffentlichung [4], wobei allerdings der Anwendungsbe- reich oftmals nicht beachtet wird.

- In [4] wird davon ausgegangen, dass die Lasten in ein Schubfeld eingeleitet werden. Dies steht im Widerspruch zur Ausgangssituation, da die Einleitung von Horizontallasten in die Dachfläche aber genau dann erforderlich wird, wenn der Längsrandträger fehlt.
- Gemäß den Zeichnungen aus [4] erfolgt die Lasteinleitung in alle Obergurte, nicht nur in einzelne Rippen.
- In [4] werden Verdrehungen der Rippen sowie die sich daraus ergebenden Verschiebungen rechtwinklig zur Dachfläche vernachlässigt.
- Das unterstellte schnelle Abklingen in Längsrichtung der Spannungen aus Querbiegemomenten steht bei kontinuierlicher Einleitung der Beanspruchung im Widerspruch zu dem verwendeten ebenen Rahmenmodell.

Die Analogie zum Schubfeld ist grundsätzlich fragwürdig, da sich aus dem Abstand zwischen der Einleitung der Beanspruchung (Obergurt oder höher) und den Auflagerkräften ein Moment ergibt. Dieses Moment erzeugt Verschiebungen rechtwinklig zur Dachfläche (z.B. entlang der Mittellinien der Ober- und Untergurte, die Symmetrielinien des periodisch aufgebauten Fal- werks darstellen), die bei Schubfeldern nicht auftreten bzw. in den zugrundeliegenden Model- len explizit zu Null gesetzt werden. Auch erfolgt die Einleitung der Beanspruchung nicht konti- nuierlich bzw. stetig in alle Rippen. Vielmehr ergibt sich das Problem der Einleitung von hori- zontalen Beanspruchungen gerade aus der örtlichen Störung.

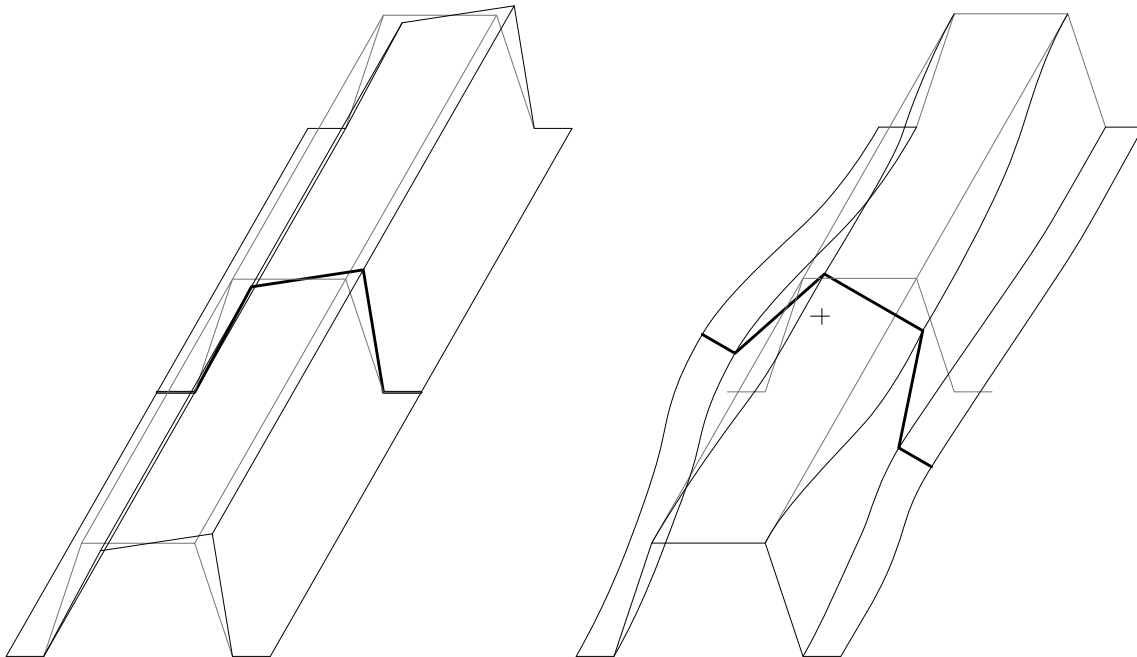
## 6 Trag- und Verformungsverhalten bei Lasteinleitung in Obergurtebene

### 6.1 Vorbemerkungen

Im vorliegenden Abschnitt wird das Trag- und Verformungsverhalten qualitativ diskutiert. Die Erläuterungen basieren auf den Ergebnissen der Versuche und numerischen Berechnungen.

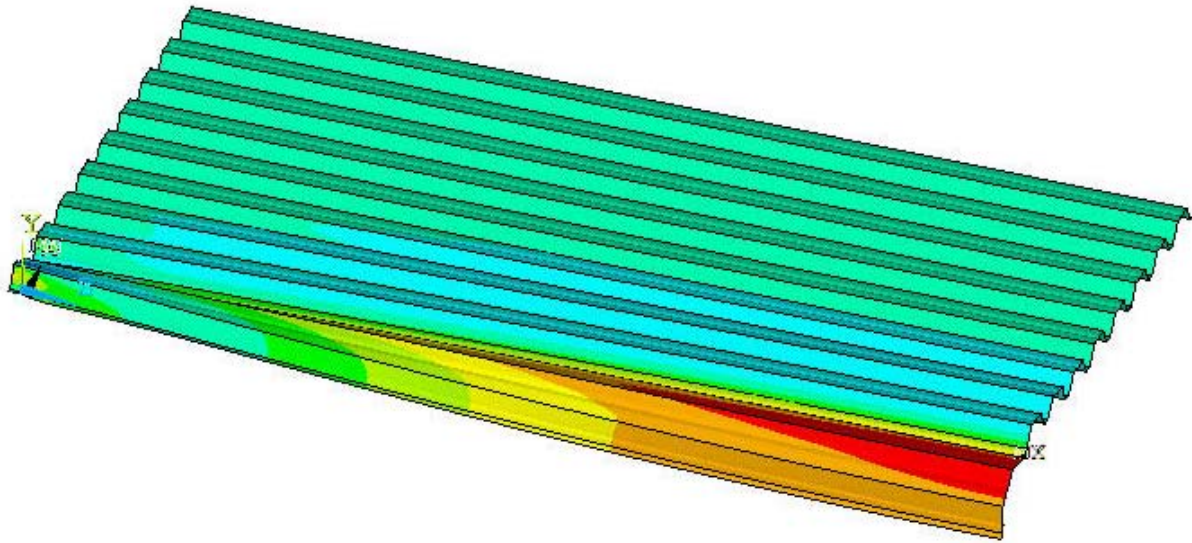
### 6.2 Gesamtsystem

Bei Belastung einer freien, ungekoppelten Randrippe kommt es zu großen Verformungen. Die Finite-Element-Berechnungen zeigen aber, dass maßgebliche Verformungen nur an den beiden äußeren Randrippen auftreten, d.h. nur an der belasteten Randrippe und der direkt anschließenden Rippe. Die Verformungen lassen sich in einen Anteil aus Verschiebung und aus Verdrehung unterteilen, wobei insbesondere die Verdrehungen recht ausgeprägt sind.



**Abbildung 4: Verschiebungen (rechts) und Verdrehungen (links)**

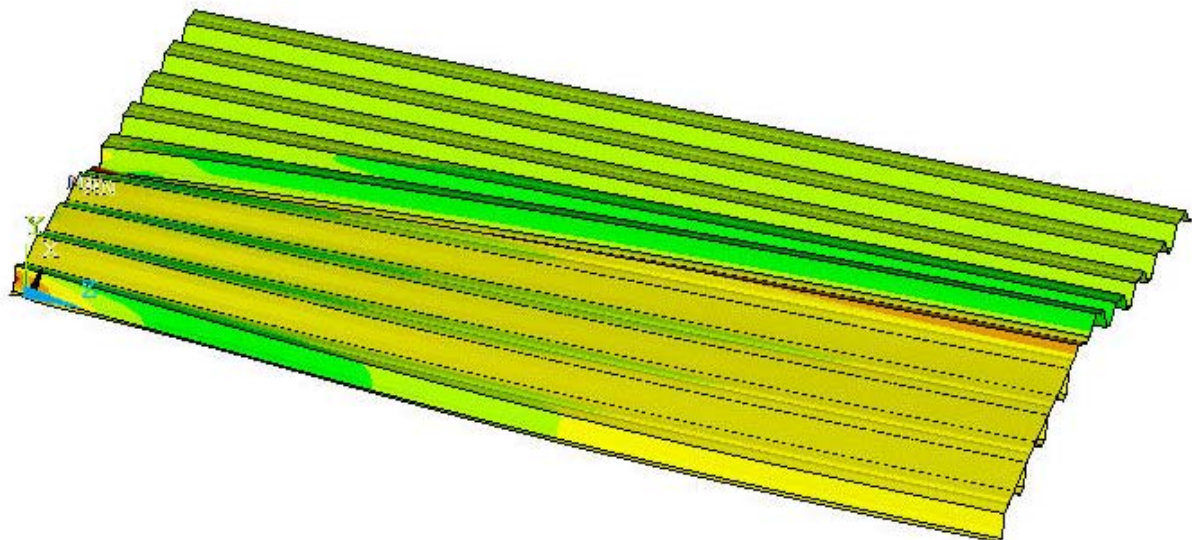
Bei kurzen Stützweiten dominieren die Verschiebungen des durch das Trapezprofil gebildeten Rahmentragwerks (Querbiegung). Mit zunehmender Stützweite nehmen die Anteile aus Torsion (mit elastisch gelagerter Drillachse) zu.



**Abbildung 5: Verformungen (farblich skalierte Verdrehungen  $\varphi_z$ ) einer freien, ungekoppelten Randrippe – halbes System**

Die elastische Lagerung der Drillachse wird von den angrenzenden Rippen gebildet, die sich infolge der Verdrehung aus der Trapezprofilebene heraus verformen (Abbildung 5).

Bei einer biegeweichen Kopplung (z.B. durch Flachblechtafeln) reduzieren sich zwar die Verschiebungen, die Verdrehungen allerdings nicht in vergleichbarem Maße, wie sich insbesondere in den Versuchen zeigte.



**Abbildung 6: Verformungen (farblich skalierte Verdrehungen  $\varphi_z$ ) bei Kopplung von vier Rippen mittels Flachblech – halbes System**

In Abbildung 6 ist zu erkennen, dass das Flachblech in Feldmitte nahezu eben bleibt, während es am Auflager die Verschränkung des durch das Trapezprofil gebildeten Rahmentragwerks mitmacht. Auch hier verformen sich die ersten nicht mehr gekoppelten Rippen aus der Trapezprofilebene heraus.



Zu berücksichtigen ist, dass in der Praxis bei der Kopplung der Rippen durch Flachbleche von einem Ausweichen der Flachbleche auszugehen ist und dass Flachbleche aufgrund der geringen Biegesteifigkeit bei Einleitung von Horizontallasten mit Hebelarmen – wie die Versuche zeigten - wirkungslos sind. Aus diesem Grund wird nachfolgend auch eine Kopplung mittels U-Profilen betrachtet, die allerdings den Nachteil hat, dass die freien Schenkel den weiteren Dachaufbau (z.B. das Einbringen der Wärmedämmung) stören.

Die nachfolgenden Diagramme und Abbildungen zeigen beispielhaft die Verschiebung  $u_x$  in Belastungsrichtung

$$u_x = q_h \cdot \delta_x \quad \text{Gl. (1)}$$

(parallel zur Dachfläche) bzw. die Verschiebung  $u_y$  rechtwinklig zur Dachfläche

$$u_y = q_h \cdot \delta_y \quad \text{Gl. (2)}$$

Für die Darstellung in den Abbildungen wurde eine Belastung von  $q_h = 0,31 \text{ N/mm}$  gewählt, die aus einer vorliegenden statischen Berechnung entnommen wurde und daher als realistische Größenordnung angesehen wurde. Erkennbar ist, dass die Belastungsrichtung (Windsog – Winddruck), abgesehen von der Richtung der Verschiebungen, keine Rolle spielt: die Verschiebungen sind gleich groß. Dies ist auch insofern interessant, als sich aus diesem Grund die nachfolgenden Untersuchungen auf eine Belastungsrichtung beschränken können.

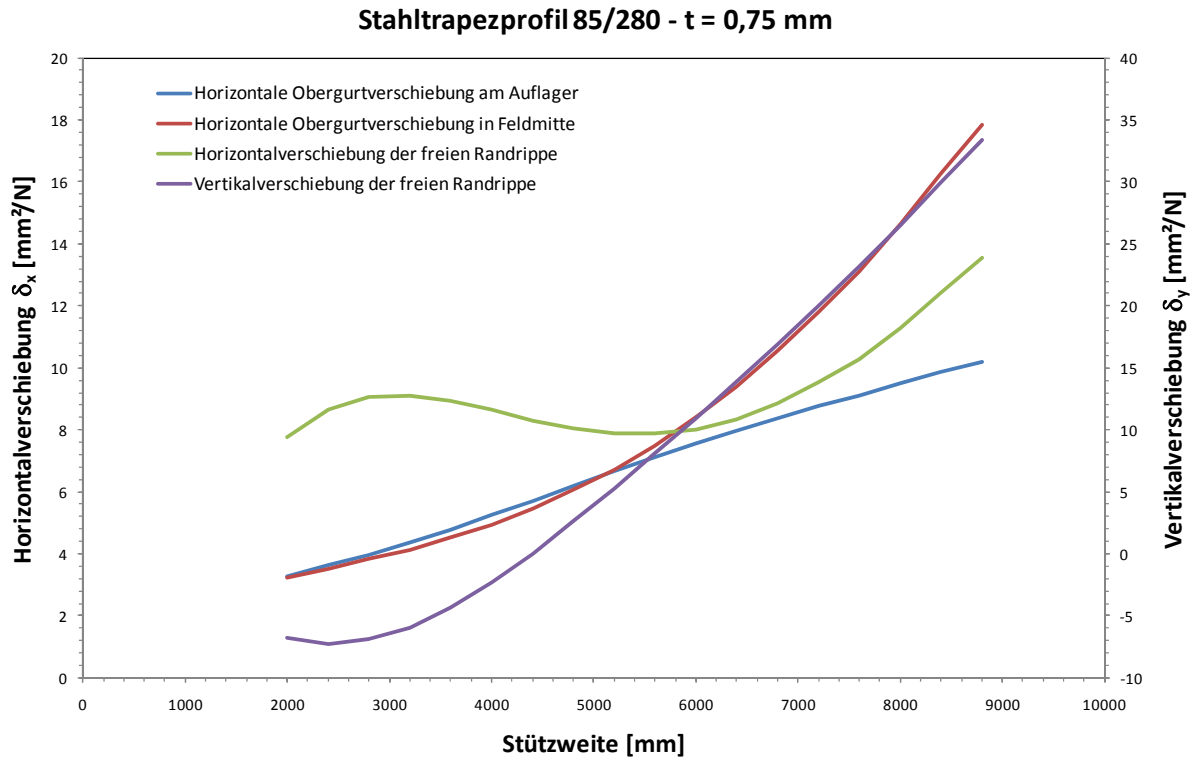


Abbildung 7: Verschiebungen  $\delta_x$  und  $\delta_y$  in Abhängigkeit von der Stützweite – zwei über Flachbleche gekoppelte Randrippen, Belastung in Richtung des freien Längsrandes („Windsog Attika“).

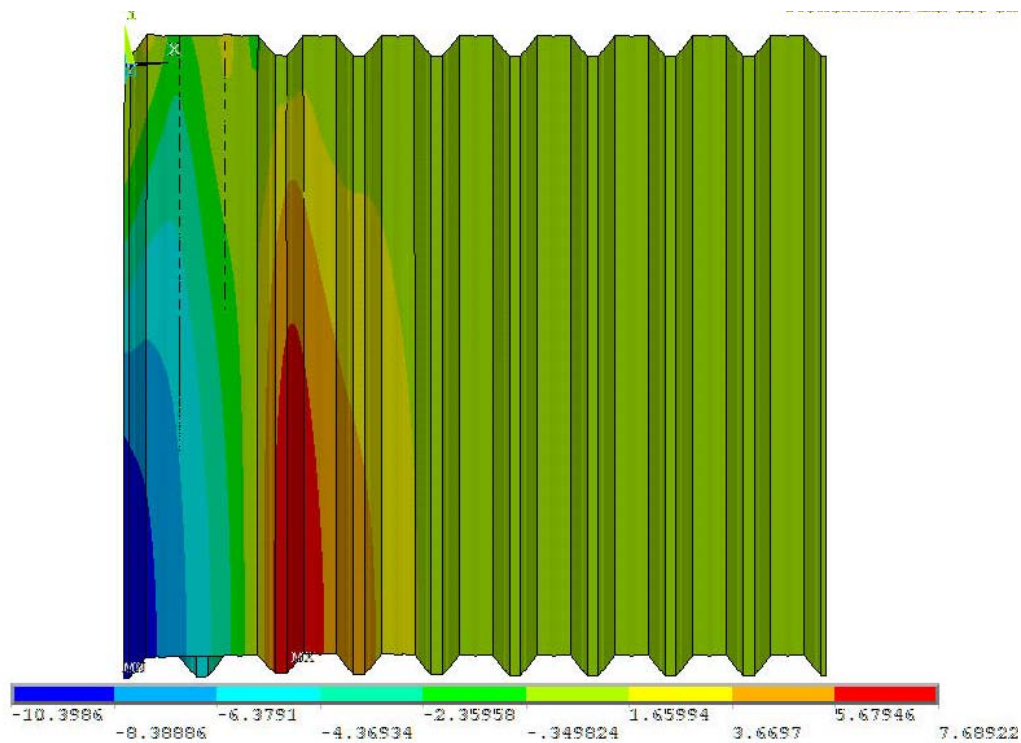


Abbildung 8: Verschiebungen  $u_y$  in [mm] rechtwinklig zur Dachebene bei einer Linienlast von  $q_h = 0,31$  N/mm und einer Stützweite  $L = 8800$  mm – zwei über Flachbleche gekoppelte Randrippen, Belastung in Richtung des freien Längsrandes („Windsog Attika“).

Stahltrapezprofil 85/280 - t = 0,75 mm

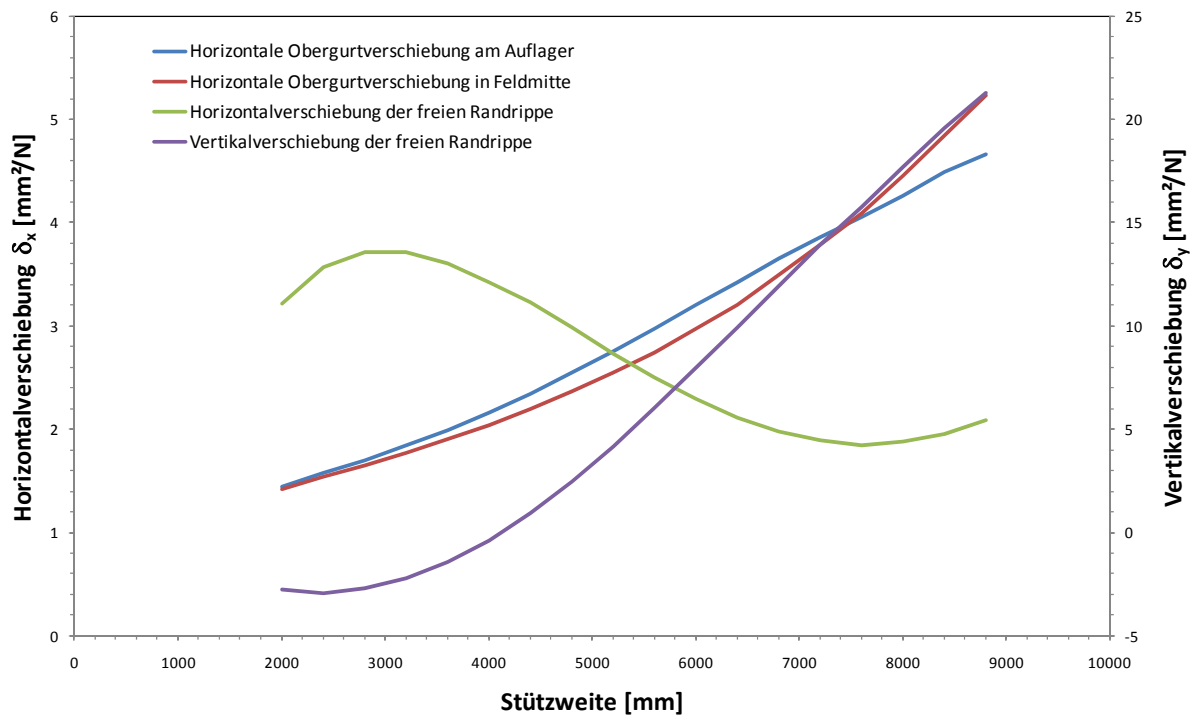


Abbildung 9: Verschiebungen  $\delta_x$  und  $\delta_y$  in Abhängigkeit von der Stützweite – vier über Flachbleche gekoppelte Randrippen, Belastung in Richtung des freien Längsrandes („Windsog Attika“).

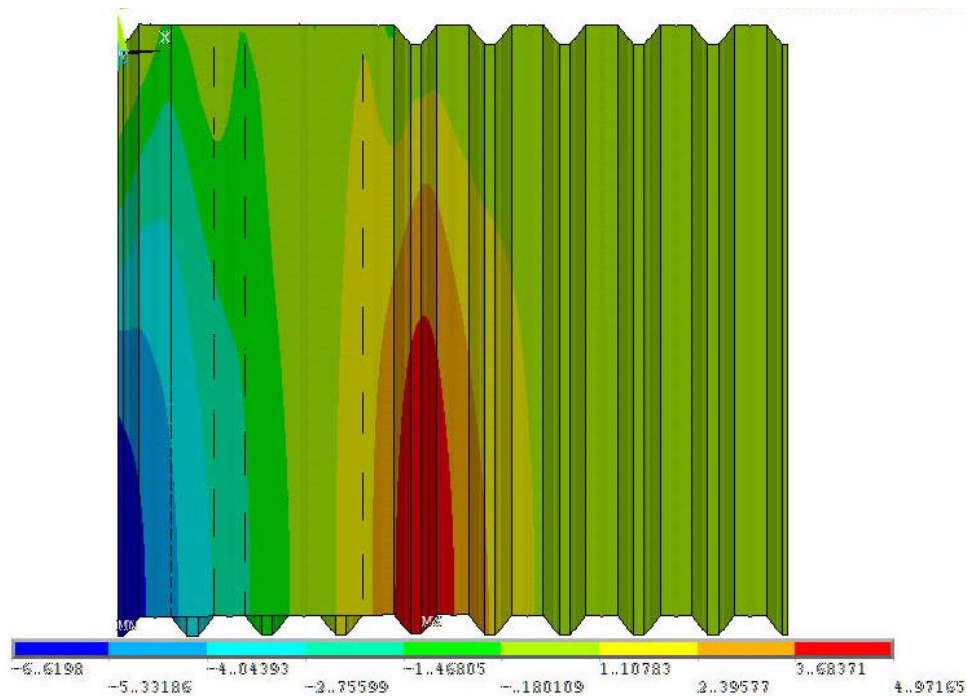


Abbildung 10: Verschiebungen  $u_y$  in  $\text{mm}$  rechtwinklig zur Dachebene bei einer Linienlast von  $q_h = 0,31 \text{ N/mm}$  und einer Stützweite  $L = 8800 \text{ mm}$  – vier gekoppelte Randrippen, Belastung in Richtung des freien Längsrandes („Windsog Attika“).

Stahltrapezprofil 85/280 - t = 0,75 mm

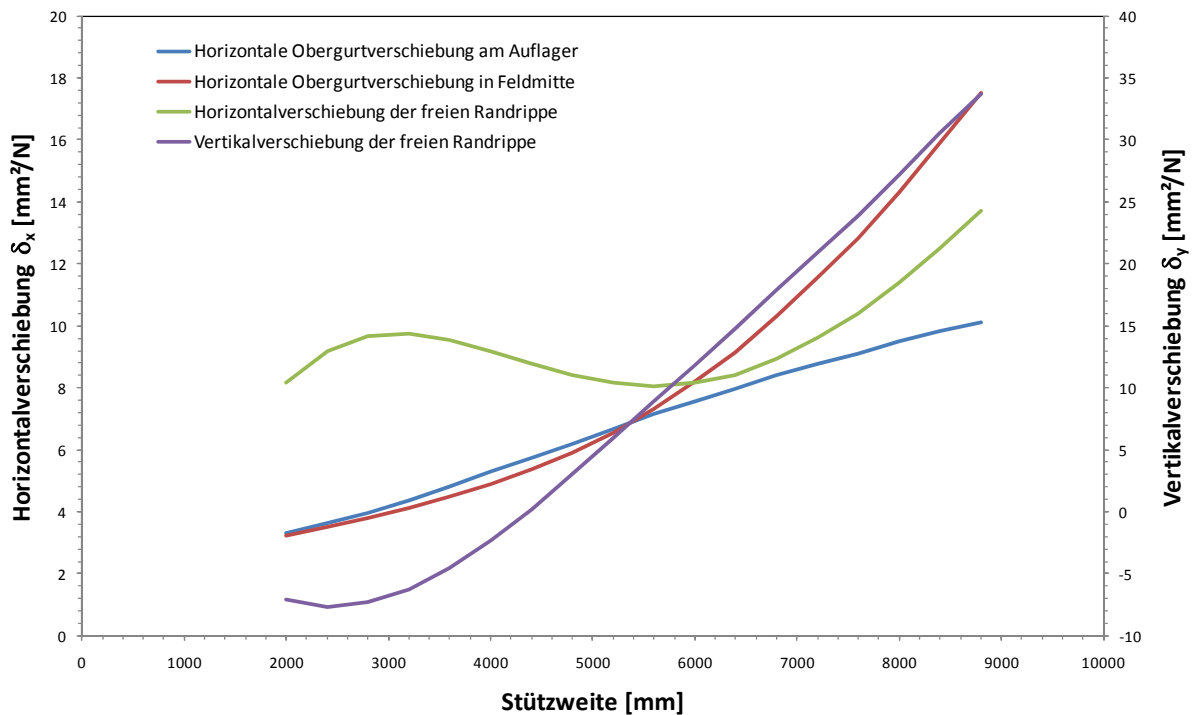


Abbildung 11: Verschiebungen  $\delta_x$  und  $\delta_y$  in Abhängigkeit von der Stützweite – zwei über Flachbleche gekoppelte Randrippen, Belastung in Richtung der Dachfläche („Winddruck Attika“).

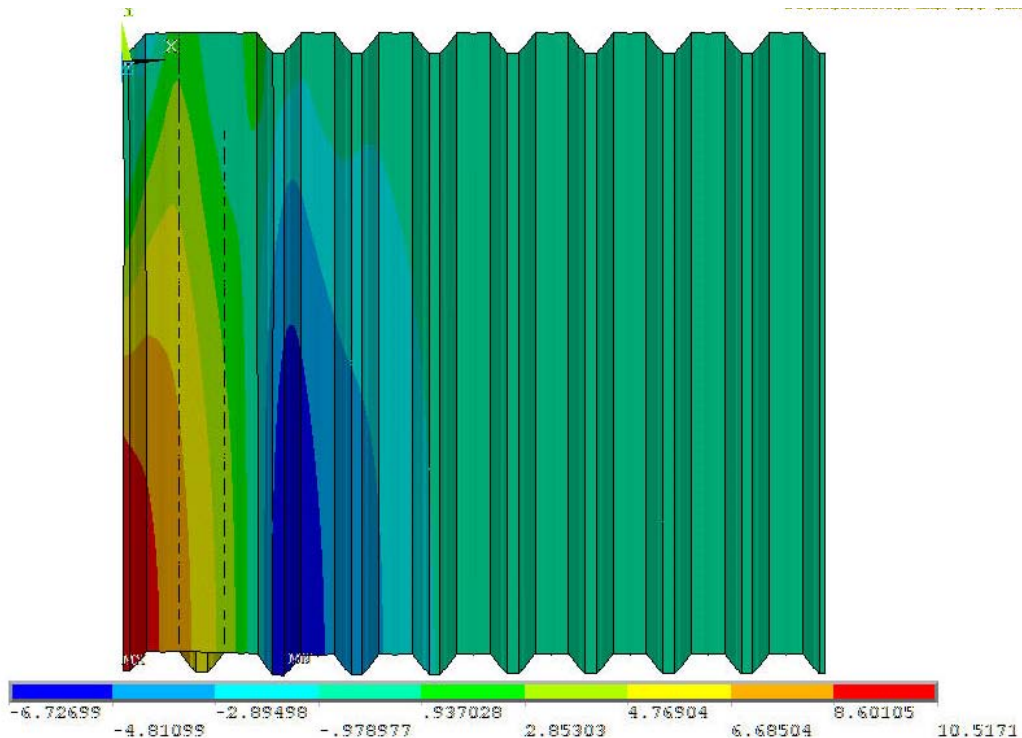


Abbildung 12: Verschiebungen  $u_y$  in [mm] rechtwinklig zur Dachebene bei einer Linienlast von  $q_h = 0,31 \text{ N/mm}$  und einer Stützweite  $L = 8800 \text{ mm}$  – zwei über Flachbleche gekoppelte Randrippen, Belastung in Richtung der Dachfläche („Winddruck Attika“).

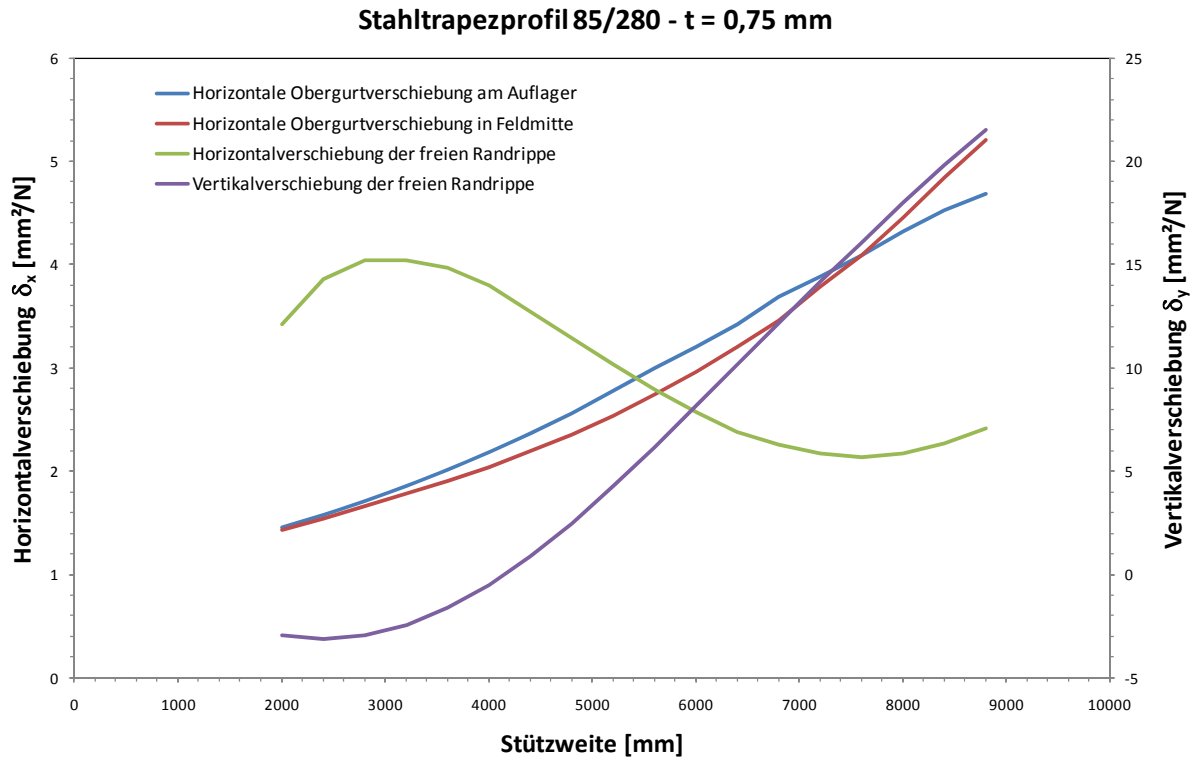


Abbildung 13: Verschiebungen  $\delta_x$  und  $\delta_y$  in Abhängigkeit von der Stützweite – vier über Flachbleche gekoppelte Randrippen, Belastung in Richtung der Dachfläche („Winddruck Attika“).

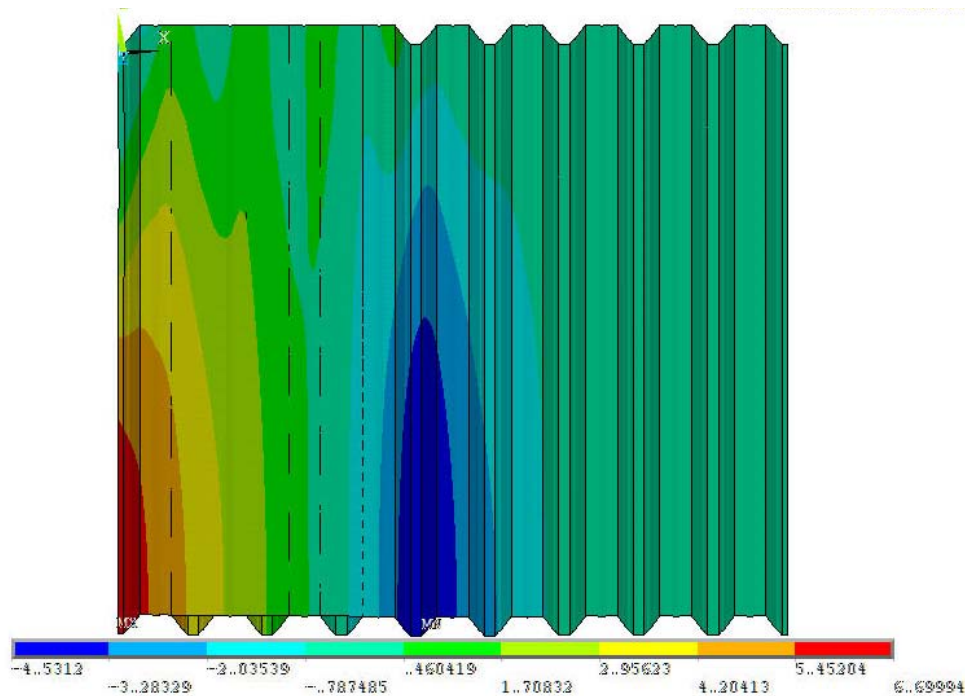
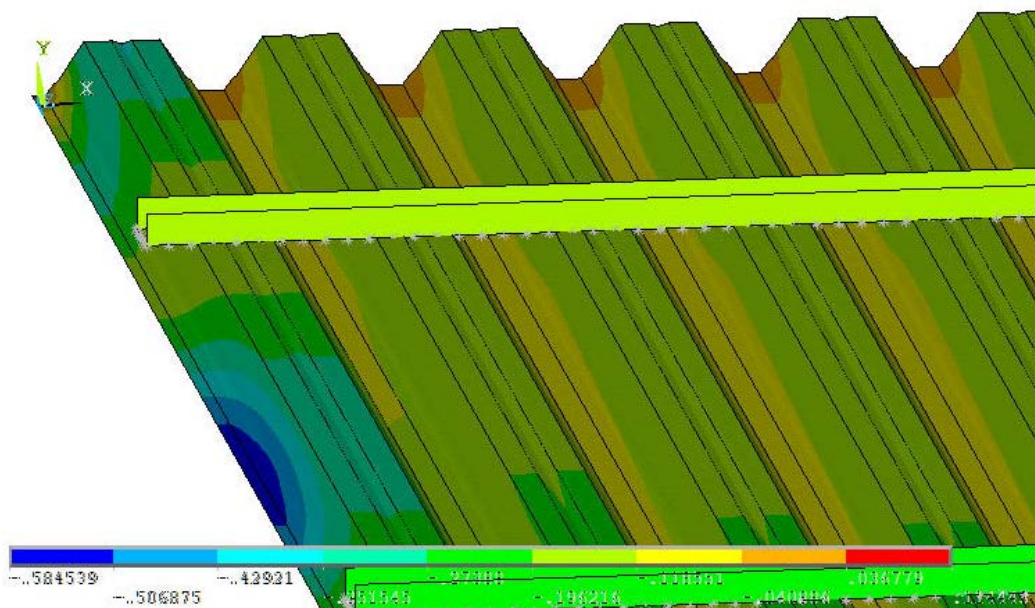


Abbildung 14: Verschiebungen  $u_y$  in [mm] rechtwinklig zur Dachebene bei einer Linienlast von  $q_h = 0,31 \text{ N/mm}$  und einer Stützweite  $L = 8800 \text{ mm}$  – vier über Flachbleche gekoppelte Randrippen, Belastung in Richtung der Dachfläche („Winddruck Attika“).

Die Diagramme zeigen, dass sich die Kopplung vorwiegend bei den Horizontalverschiebungen auswirkt: Allein aus der Skalierung der linken y-Achse erkennt man, wie stark die Kopplung die Verschiebungen in Krafrichtung reduziert. Für den hier betrachteten Fall eines Trapezprofils 85/280 – t = 0,75 mm führt aber selbst die Kopplung von vier Rippen mittels Flachblech nicht zu vertretbaren Verschiebungen. Koppelt man die Rippen stattdessen mit U-Profilen (hier U-Profile 50/100/3) oder L-Profilen (hier L-Profile 50/50/3), so ergeben sich bei vier gekoppelten Rippen geringfügig größere Verschiebungen  $u_y$  als bei der Kopplung durch Flachbleche (vgl. Abbildung 10 mit Abbildung 17 und Abbildung 19).



**Abbildung 15: Wirkungswiese der Kopplungen: Verschiebungen  $u_x$  in [mm].**

Stahltrapezprofil 85/280 - t = 0,75 mm

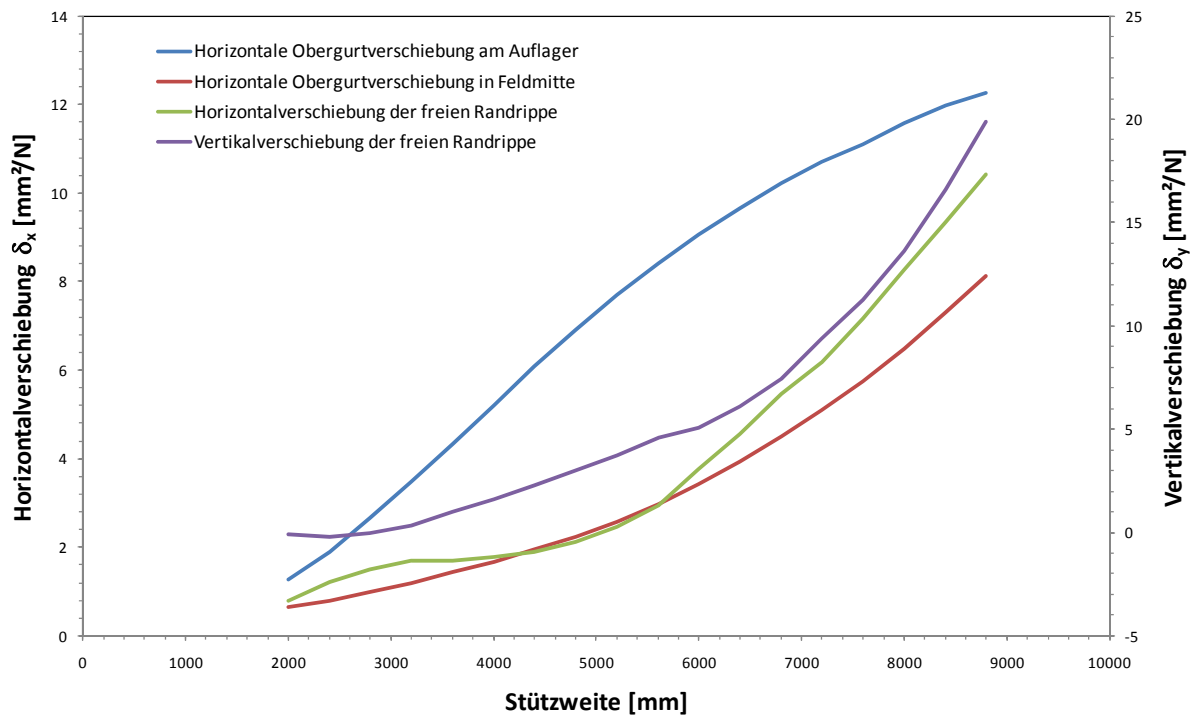


Abbildung 16: Verschiebungen  $\delta_x$  und  $\delta_y$  in Abhängigkeit von der Stützweite – vier über U-Profile 50/100/3 bei L/3 gekoppelte Randrippen, Belastung in Richtung des freien Längsrandes („Windsog Attika“).

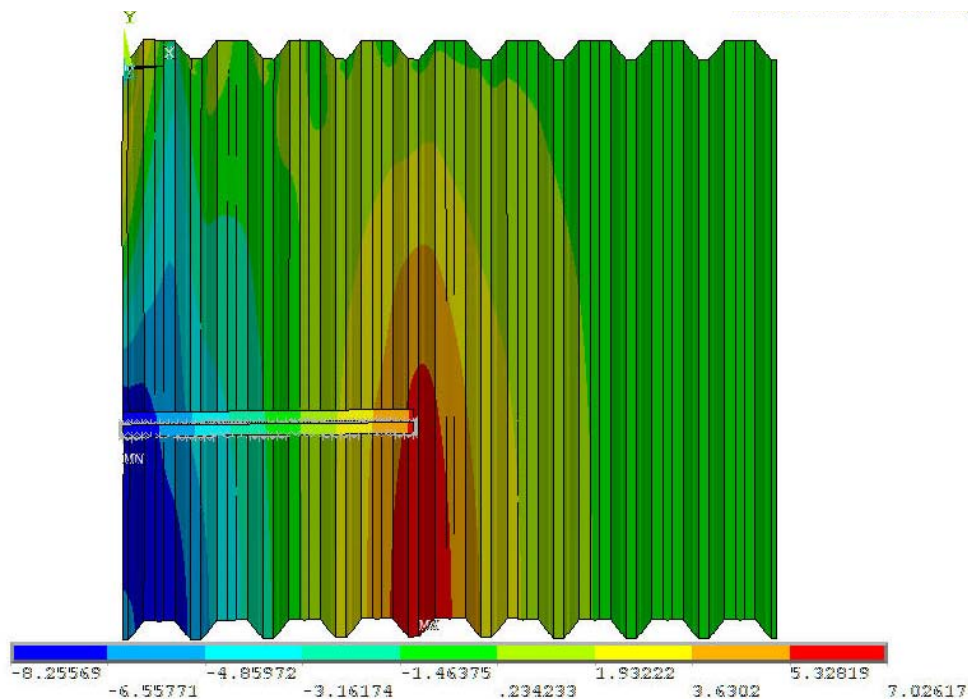


Abbildung 17: Verschiebungen  $u_y$  in [mm] rechtwinklig zur Dachebene bei einer Linienlast von  $q_n = 0,31$  N/mm und einer Stützweite  $L = 8800$  mm – vier über Profile 50/100/3 bei L/3 gekoppelte Randrippen, Belastung in Richtung des freien Längsrandes („Windsog Attika“).



Stahltrapezprofil 85/280 - t = 0,75 mm

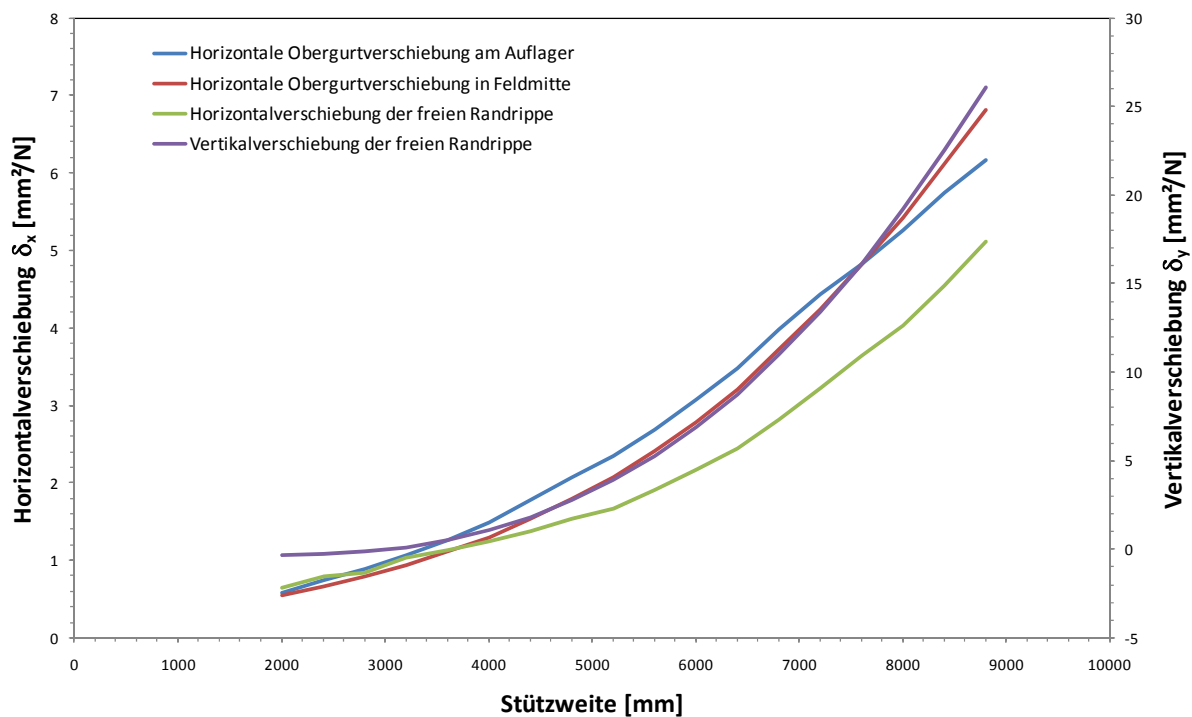


Abbildung 18: Verschiebungen  $\delta_x$  und  $\delta_y$  in Abhängigkeit von der Stützweite – vier über U-Profile 50/100/3 bei L/4 gekoppelte Randrippen, Belastung in Richtung des freien Längsrandes („Windsog Attika“).

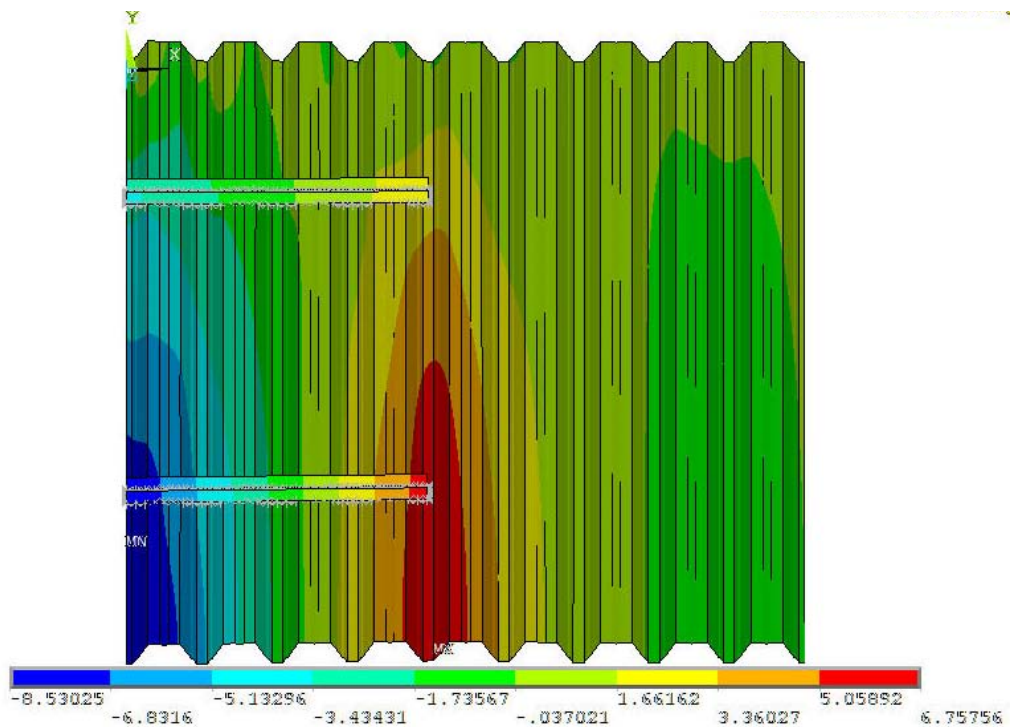


Abbildung 19: Verschiebungen  $u_y$  in [mm] rechtwinklig zur Dachebene bei einer Linienlast von  $q_h = 0,31$  N/mm und einer Stützweite  $L = 8800$  mm – vier über U-Profile 50/100/3 bei L/4 gekoppelte Randrippen, Belastung in Richtung des freien Längsrandes („Windsog Attika“).



Stahltrapezprofil 85/280 - t = 0,75 mm

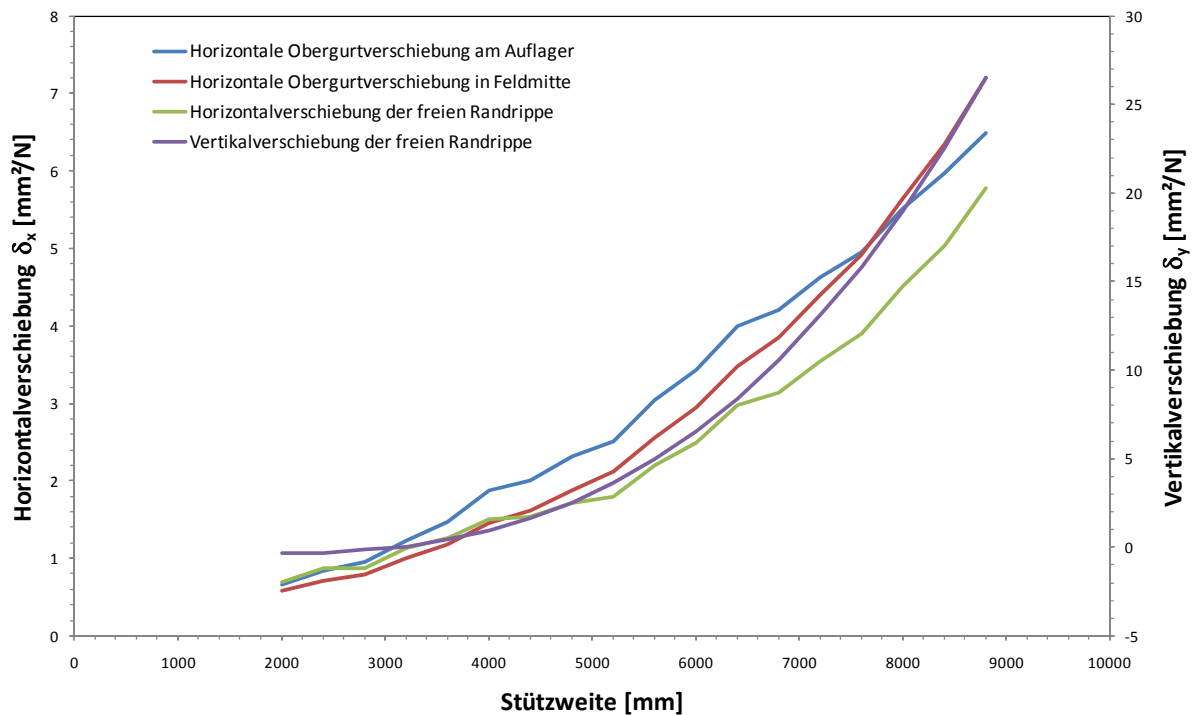


Abbildung 20: Verschiebungen  $\delta_x$  und  $\delta_y$  in Abhängigkeit von der Stützweite – vier über L-Profile 50/50/3 bei L/4 gekoppelte Randrippen, Belastung in Richtung des freien Längsrandes („Windsog Attika“).

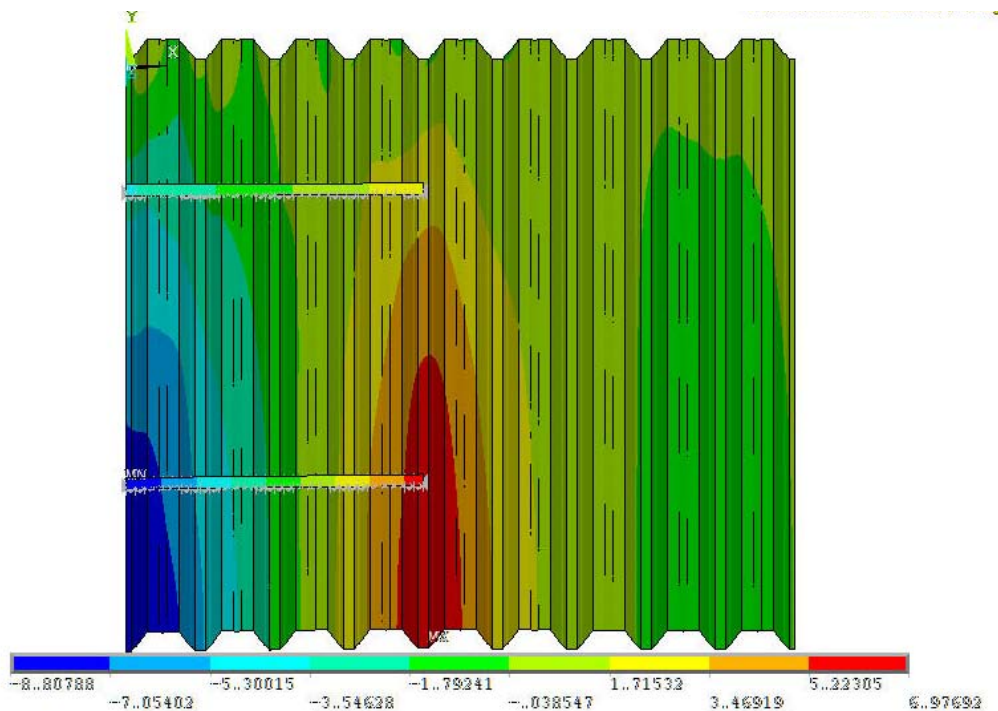


Abbildung 21: Verschiebungen  $u_y$  in [mm] rechtwinklig zur Dachebene bei einer Linienlast von  $q_h = 0,31$  N/mm und einer Stützweite  $L = 8800$  mm – vier über L-Profile 50/50/3 bei L/4 gekoppelte Randrippen, Belastung in Richtung des freien Längsrandes („Windsog Attika“).

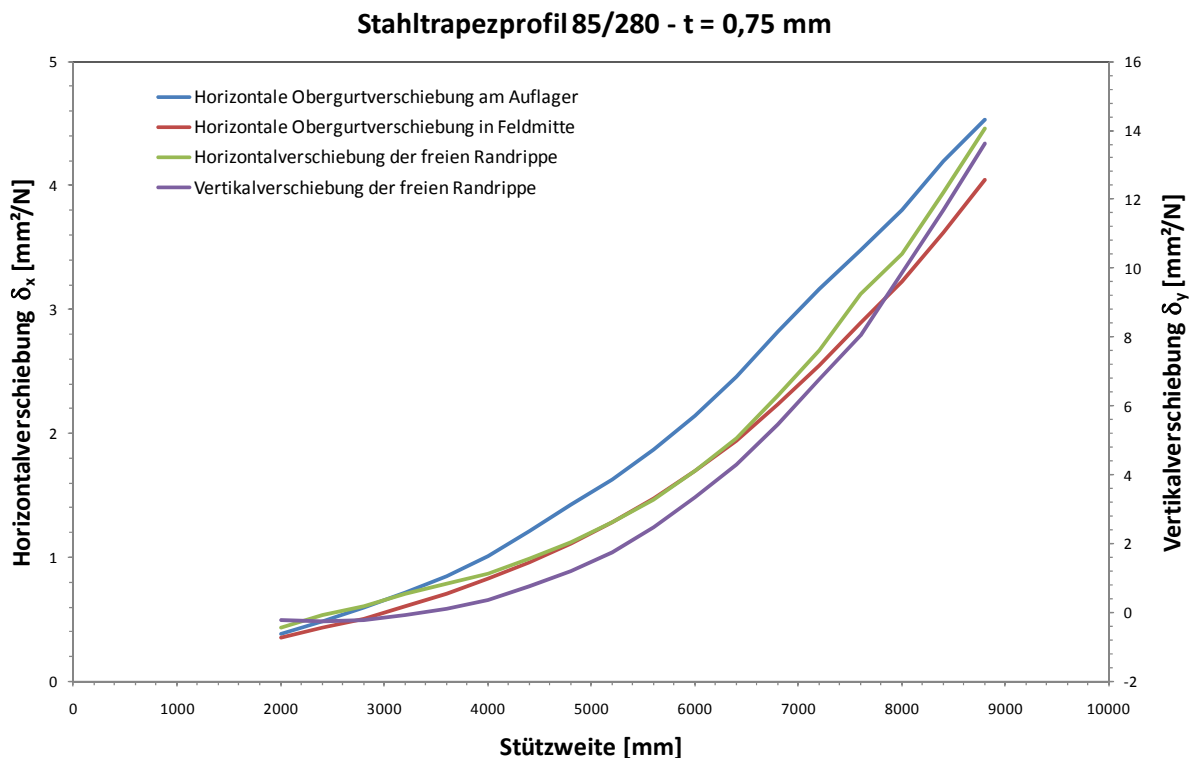
Erst bei einer Kopplung von sechs oder acht Rippen liegen die Verschiebungen  $u_y$  in vertretbarem Rahmen, wobei sich der „vertretbare Rahmen“ in Anlehnung an DIN 18807-3 wie folgt definieren lässt:

- bei Dächern mit oberseitiger Abdichtung (Warmdach, Folien- oder Bitumendach):  
 $u_y \leq u_{y,max} = L/300$
- bei Dächern mit oberseitiger Deckung (Tragschale eines zweischaligen Daches):  
 $u_y \leq u_{y,max} = L/150$

Für das zweischalige Dach ergibt sich für die beiden in Abbildung 23 und Abbildung 28 dargestellten Fälle mit 8800 mm Stützweite über das Verformungskriterium

$$q_{h,max} = \frac{u_{y,max}}{\delta_y} = \frac{L}{150 \cdot \delta_y} \quad \text{Gl. (3)}$$

eine maximale Horizontalkraft von 5,6 kN/m (6 Rippen gekoppelt) bzw. 10,7 kN/m (8 Rippen gekoppelt).



**Abbildung 22: Verschiebungen  $\delta_x$  und  $\delta_y$  in Abhängigkeit von der Stützweite – sechs über U-Profile 50/100/3 bei L/4 gekoppelte Randrippen, Belastung in Richtung des freien Längsrandes („Windsog Attika“).**

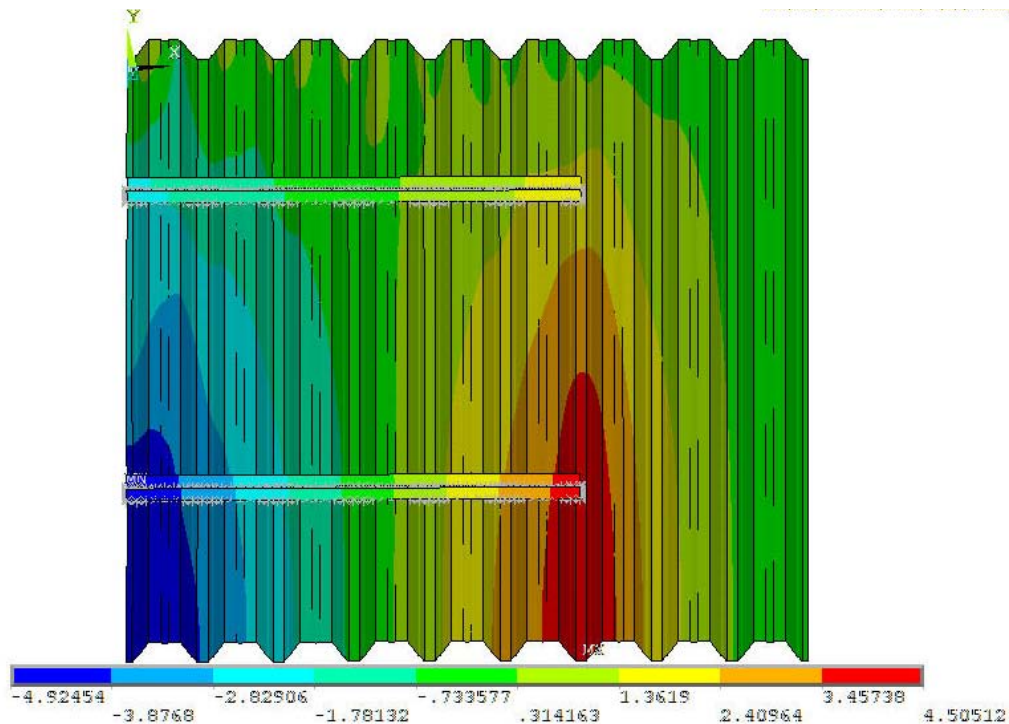


Abbildung 23: Verschiebungen  $u_y$  in [mm] rechtwinklig zur Dachebene bei einer Linienlast von  $q_h = 0,31$  N/mm und einer Stützweite  $L = 8800$  mm – sechs über U-Profile 50/100/3 bei  $L/4$  gekoppelte Randrippen, Belastung in Richtung des freien Längsrandes („Windsog Attika“).

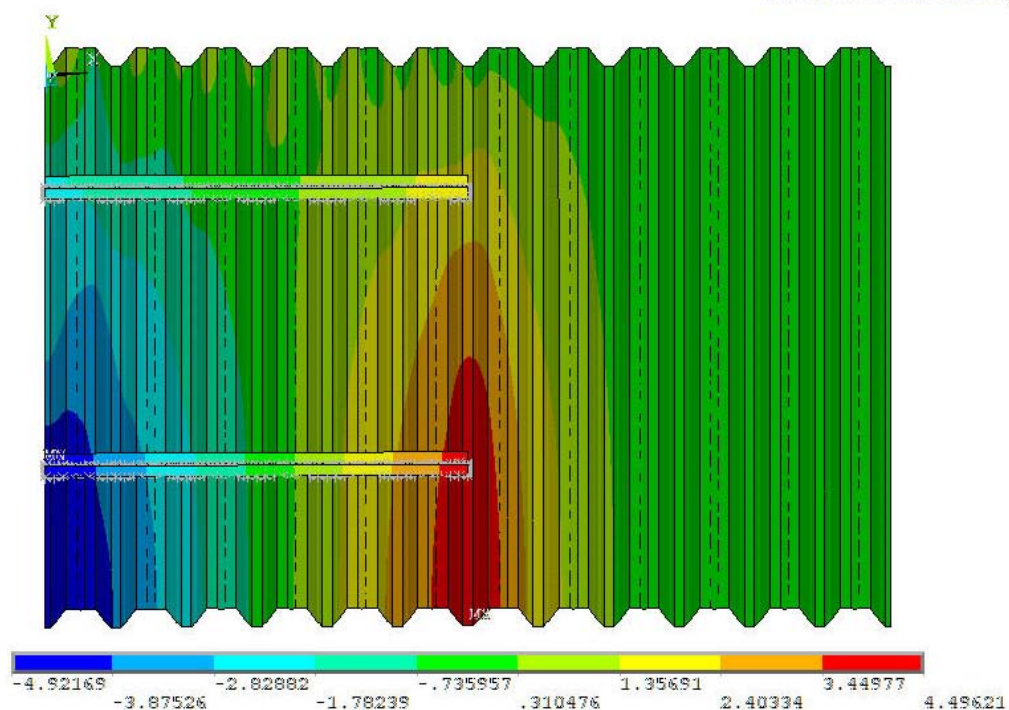


Abbildung 24: Wie Abbildung 23, jedoch mit größerem Gesamtsystem in der Berechnung

Stahltrapezprofil 85/280 - t = 0,75 mm

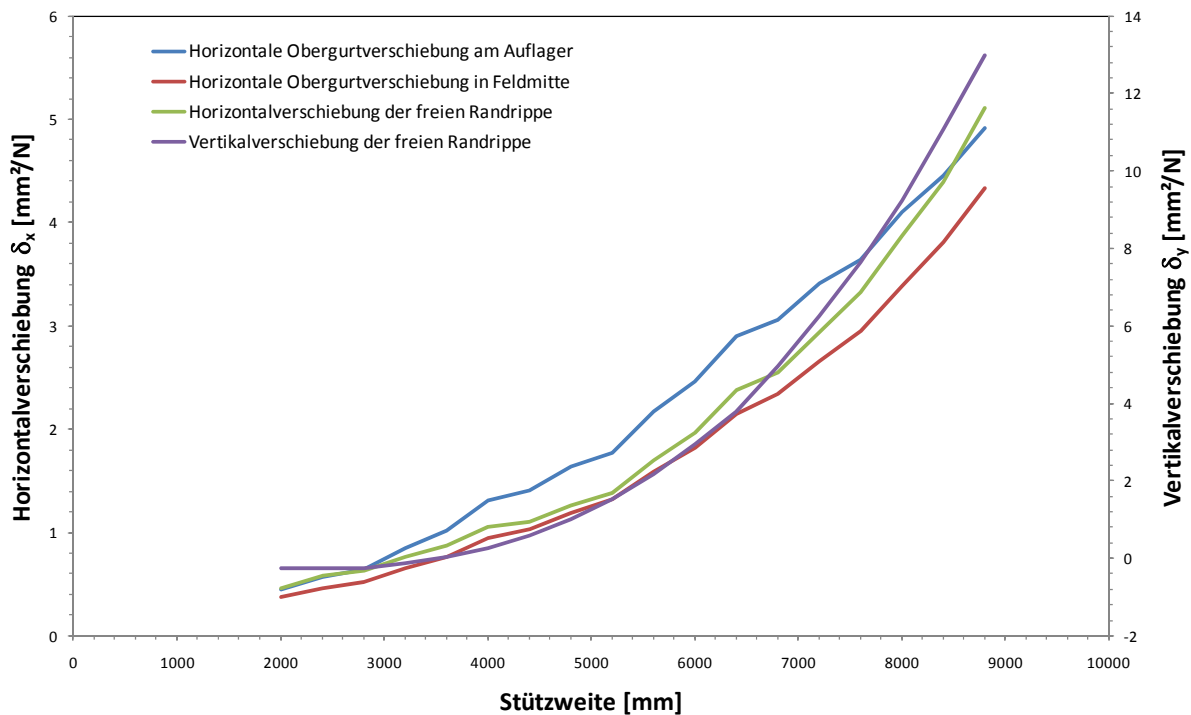


Abbildung 25: Verschiebungen  $\delta_x$  und  $\delta_y$  in Abhängigkeit von der Stützweite – sechs über L-Profile 50/50/3 bei L/4 gekoppelte Randrippen, Belastung in Richtung des freien Längsrandes („Windsog Attika“).

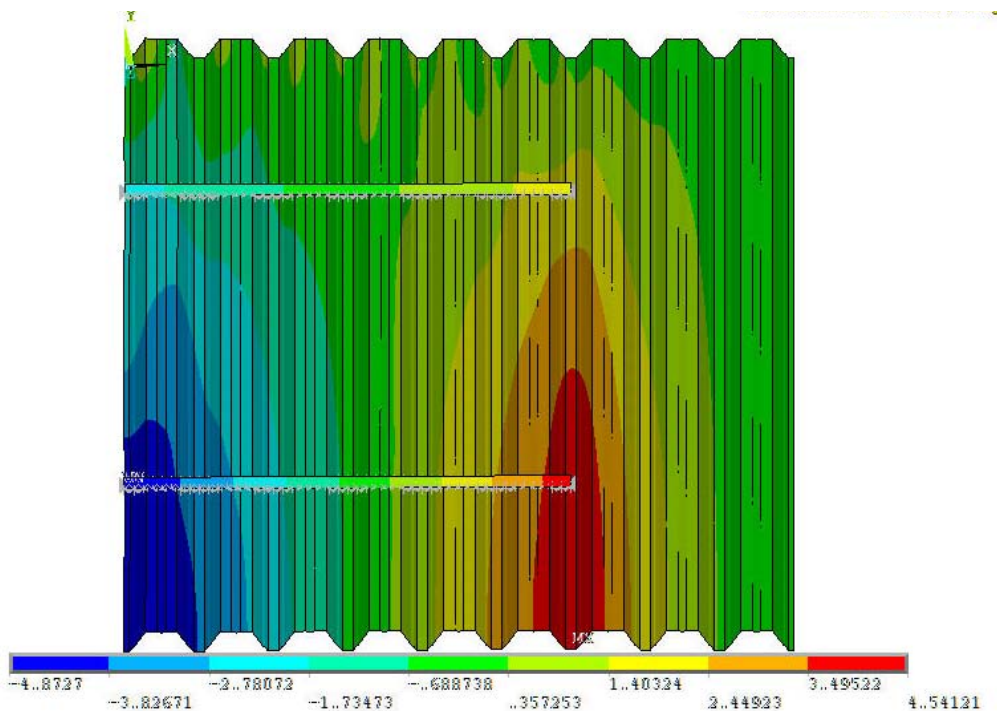


Abbildung 26: Verschiebungen  $u_y$  in [mm] rechtwinklig zur Dachebene bei einer Linienlast von  $q_h = 0,31$  N/mm und einer Stützweite  $L = 8800$  mm – sechs über L-Profile 50/50/3 bei L/4 gekoppelte Randrippen, Belastung in Richtung des freien Längsrandes („Windsog Attika“).

Stahltrapezprofil 85/280 - t = 0,75 mm

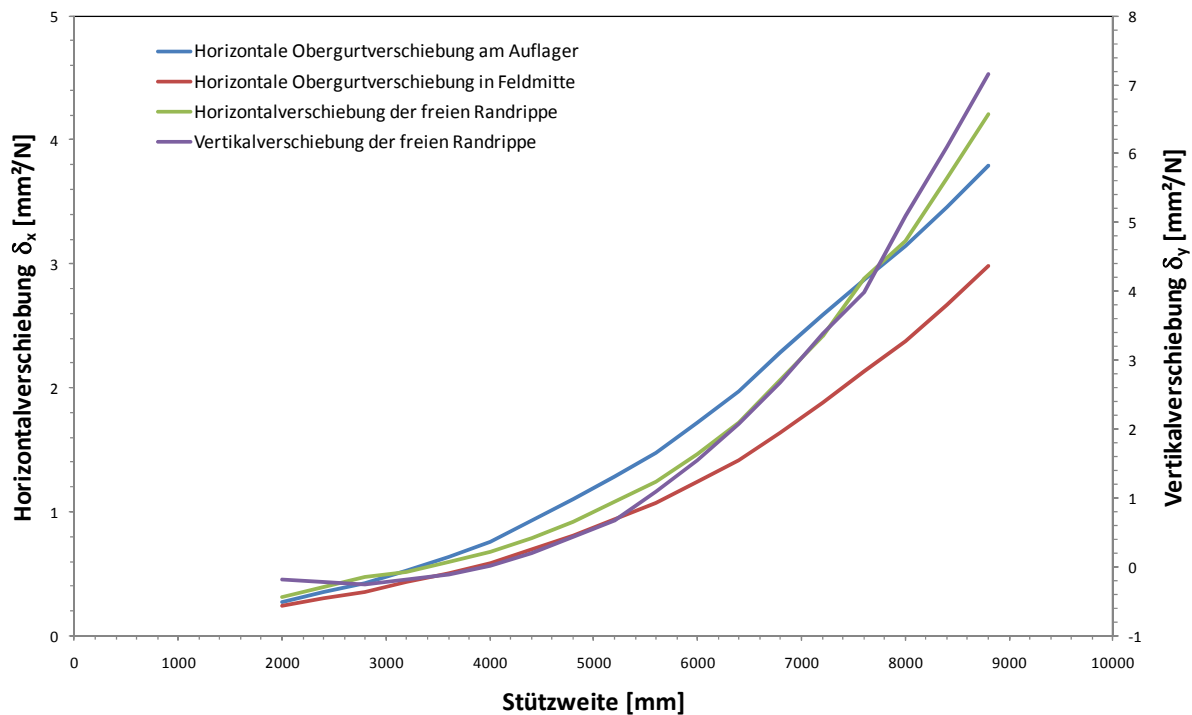


Abbildung 27: Verschiebungen  $\delta_x$  und  $\delta_y$  in Abhängigkeit von der Stützweite – acht über U-Profile 50/100/3 bei L/4 gekoppelte Randrippen, Belastung in Richtung des freien Längsrandes („Windsog Attika“).

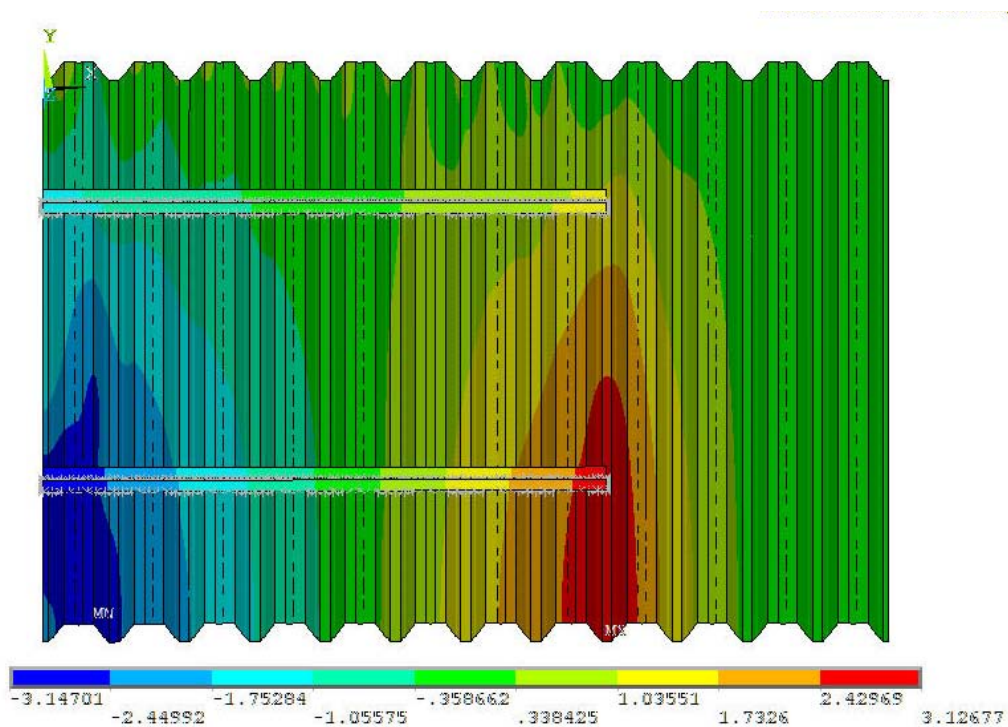


Abbildung 28: Verschiebungen  $u_y$  in [mm] rechtwinklig zur Dachebene bei einer Linienlast von  $q_h = 0,31$  N/mm und einer Stützweite  $L = 8800$  mm – acht über U-Profile 50/100/3 bei L/4 gekoppelte Randrippen, Belastung in Richtung des freien Längsrandes („Windsog Attika“).



Stahltrapezprofil 85/280 - t = 0,75 mm

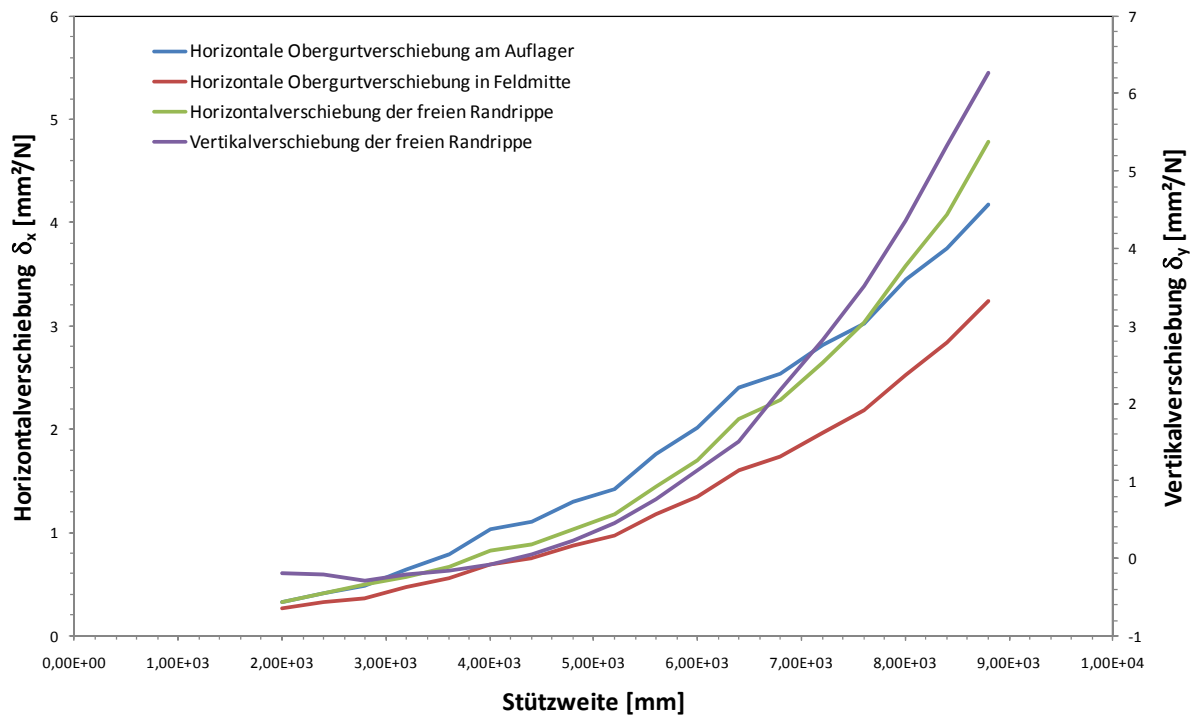


Abbildung 29: Verschiebungen  $\delta_x$  und  $\delta_y$  in Abhängigkeit von der Stützweite – acht über L-Profile 50/50/3 bei L/4 gekoppelte Randrippen, Belastung in Richtung des freien Längsrandes („Windsog Attika“).

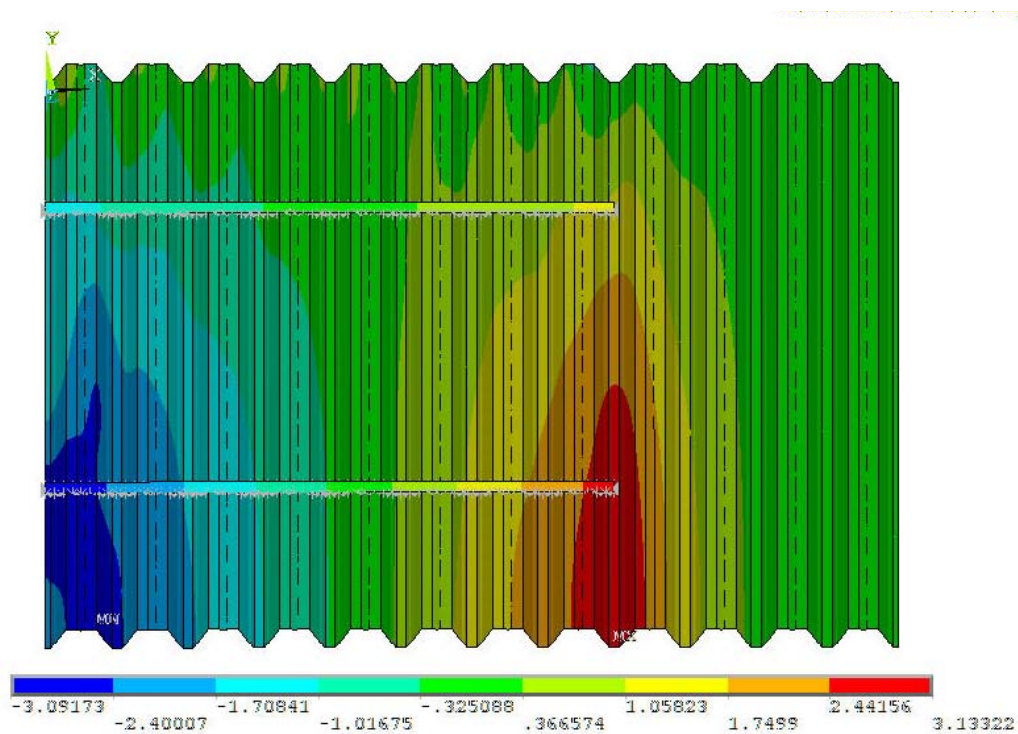


Abbildung 30: Verschiebungen  $u_y$  in [mm] rechtwinklig zur Dachebene bei einer Linienlast von  $q_h = 0,31$  N/mm und einer Stützweite  $L = 8800$  mm – acht über L-Profile 50/50/3 bei L/4 gekoppelte Randrippen, Belastung in Richtung des freien Längsrandes („Windsog Attika“).

Erfolgt die Belastung in Verbindung mit einem Hebelarm gemäß Abbildung 31, ergeben sich für  $e = 100$  mm die in Abbildung 32 und Abbildung 33 dargestellten Verschiebungen  $u_y$ .

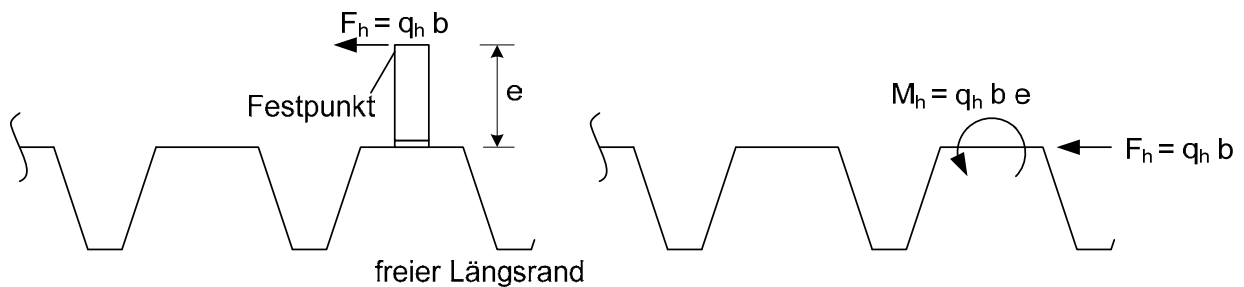


Abbildung 31: Belastung in Verbindung mit Hebelarm e

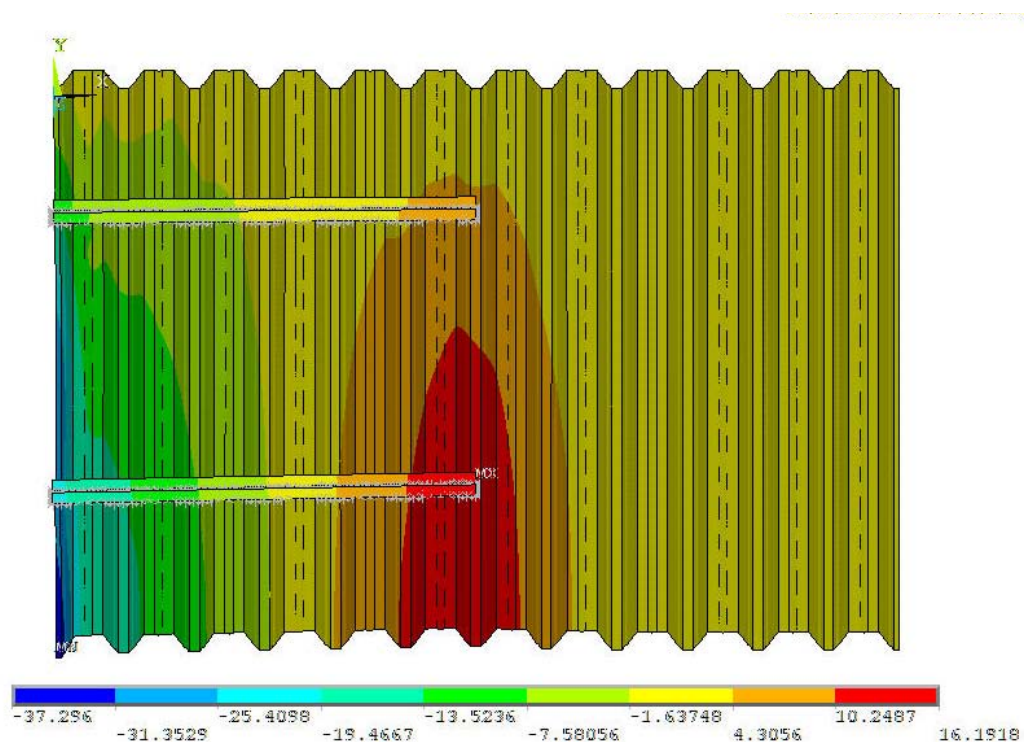


Abbildung 32: Verschiebungen  $u_y$  in [mm] rechtwinklig zur Dachebene bei einer Linienlast von  $q_h = 0,31$  N/mm mit Hebelarm  $e = 100$  mm und einer Stützweite  $L = 8800$  mm – sechs über U-Profile 50/100/3 bei L/4 gekoppelte Randrippen, Belastung in Richtung des freien Längsrandes („Dachschub“).

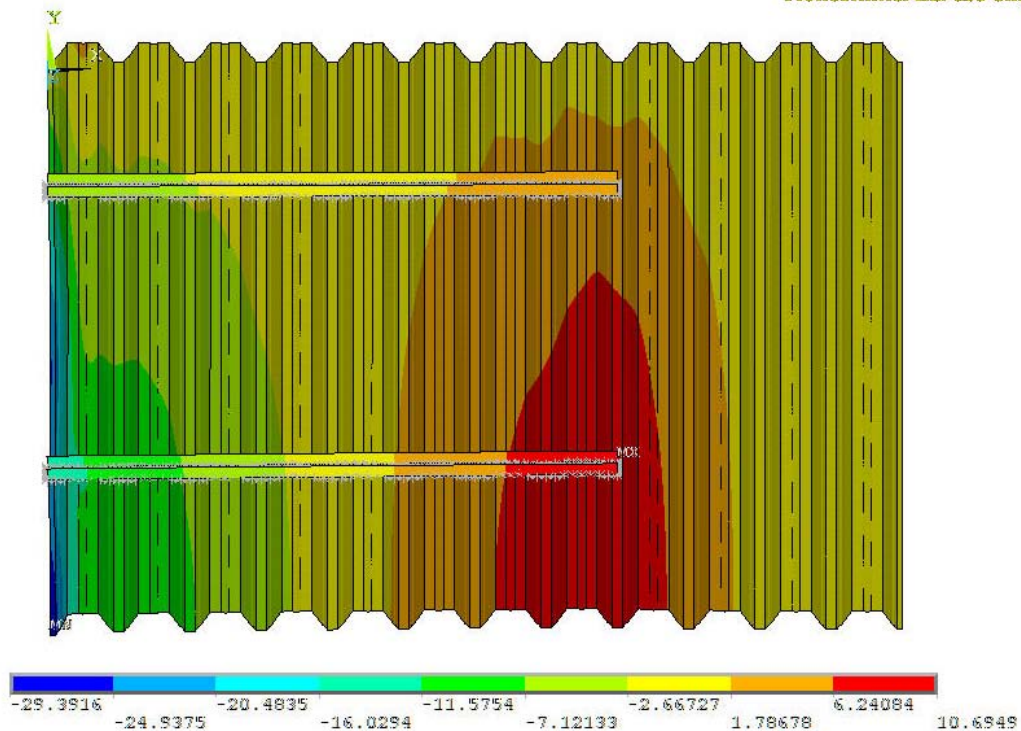


Abbildung 33: Verschiebungen  $u_y$  in [mm] rechtwinklig zur Dachebene bei einer Linienlast von  $q_h = 0,31$  N/mm mit Hebelarm  $e = 100$  mm und einer Stützweite  $L = 8800$  mm – acht über U-Profile 50/100/3 bei L/4 gekoppelte Randrippen, Belastung in Richtung des freien Längsrandes („Dachschub“).

Die Verformungen reduzieren sich selbst bei der vergleichbar geringen Beanspruchung nicht auf ein erträgliches Maß. Da infolgedessen auch mit Beschädigungen der Außenschale (zusätzliche Biegebeanspruchung der Außenschale, Zugversagen der Verbindungen, Aushebeln von Stehfalzprofilhaltern aus der Verbördelung) kommen kann, erscheint die Lasteinleitung mit einem Hebelarm nicht mit vertretbarem Aufwand realisierbar und wird daher nicht weiter untersucht. Praktisch muß das Moment durch weitere Stehfalzprofilhalter auf den benachbarten Obergurten abgetragen werden, d.h. die Einleitung des Moments muß über andrückende und abhebende Einzelkräfte nachgewiesen werden. Für die Horizontalkraft kann anschließend auf die nachfolgend behandelten Ansätze mit  $e = 0$  mm zurückgegriffen werden.

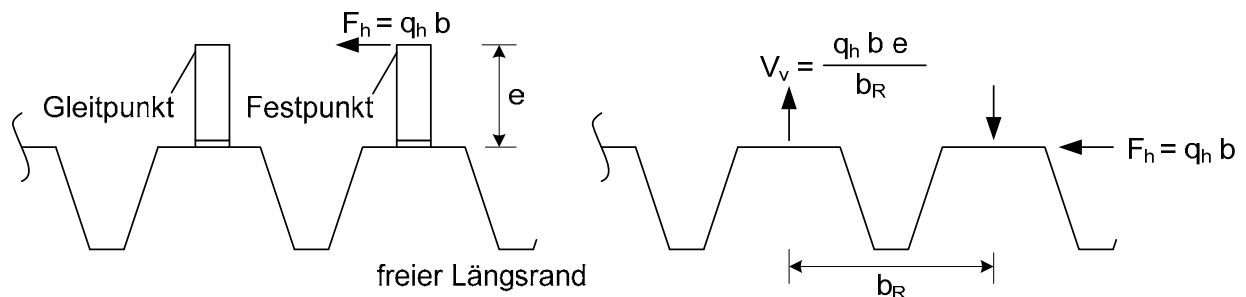


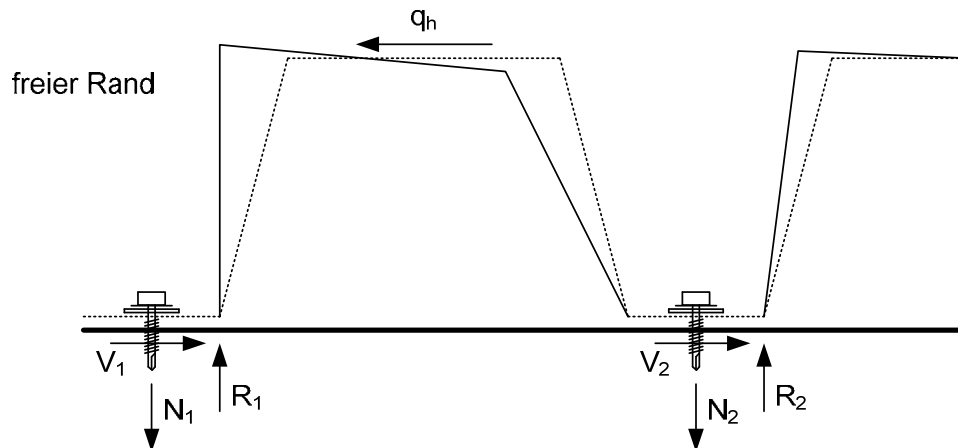
Abbildung 34: Belastung in Verbindung mit Hebelarm  $e$  bei mehreren Stehfalzprofilhaltern



### 6.3 Auflager

#### 6.3.1 Vorbemerkungen

Im folgenden Abschnitt erfolgt eine qualitative und - für einzelne Beispiele – auch quantitative Diskussion der Auflagerkräfte in Abhängigkeit verschiedener Parametern wie z.B. Steifigkeit (Blechdicke  $t$ ), Stützweite  $L$  etc. Für die an den einzelnen mit der Unterkonstruktion (Binder, Hallenrahmen) verbundenen Untergurten angreifende Auflagerkräfte gelten die Definitionen in Abbildung 35.



**Abbildung 35: Definition der Auflagerkräfte und Zählung ausgehend vom freien belasteten Längsrand der Tragschale**

Dabei ist

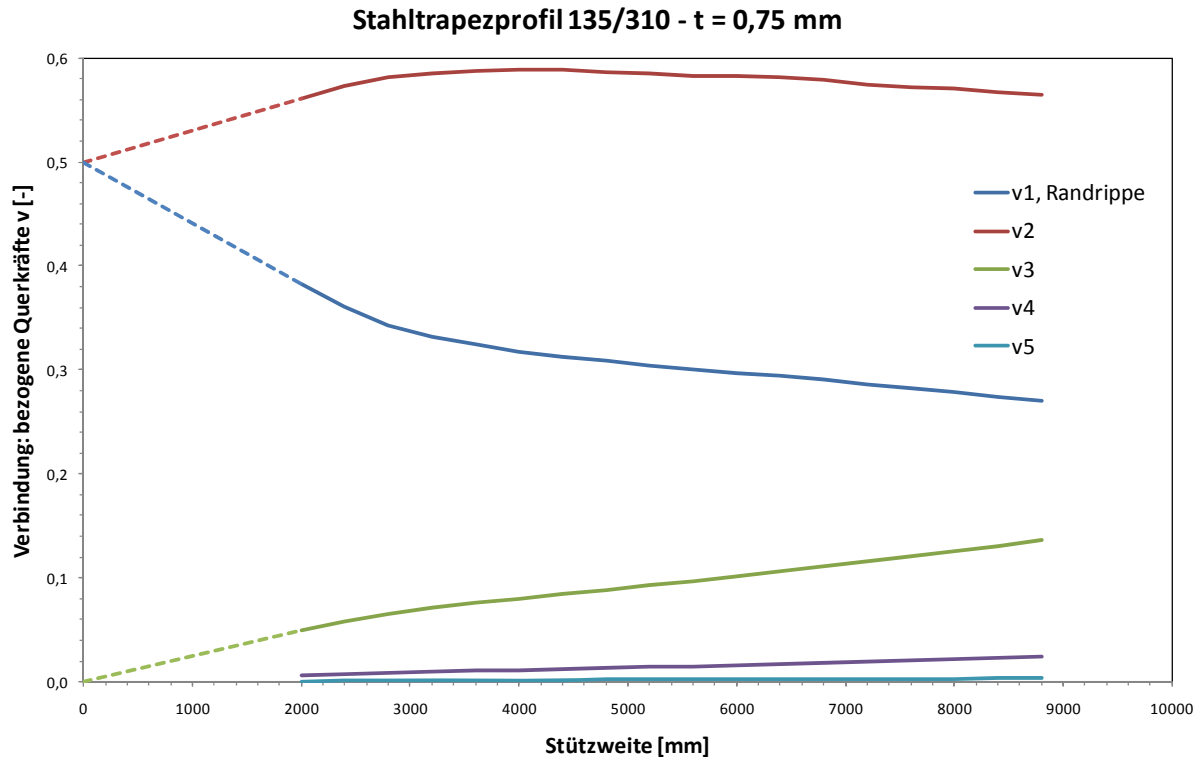
$$V = \sum V_i = \frac{q \cdot L}{2} \quad \text{Gl. (4)}$$

und

$$\sum R_i = \sum N_i \quad \text{Gl. (5)}$$

#### 6.3.2 Querkräfte

Erfolgt die Lasteinleitung ausschließlich in die äußere Rippe, ergibt sich der in Abbildung 36 beispielhaft für ein Trapezprofil 135/310 –  $t = 0,75$  mm mit Belastung in Richtung des freien Längsrandes („Windsog Attika“) dargestellte Verlauf.



**Abbildung 36: Verteilung der Querkräfte über die Verbindungen („Windsog Attika“)**

Als untere Grenze ergibt sich bei einer Stützweite von  $L \rightarrow 0$  eine gleichmäßige Verteilung der Auflagerkräfte auf die beiden äußeren angeschlossenen Untergurte

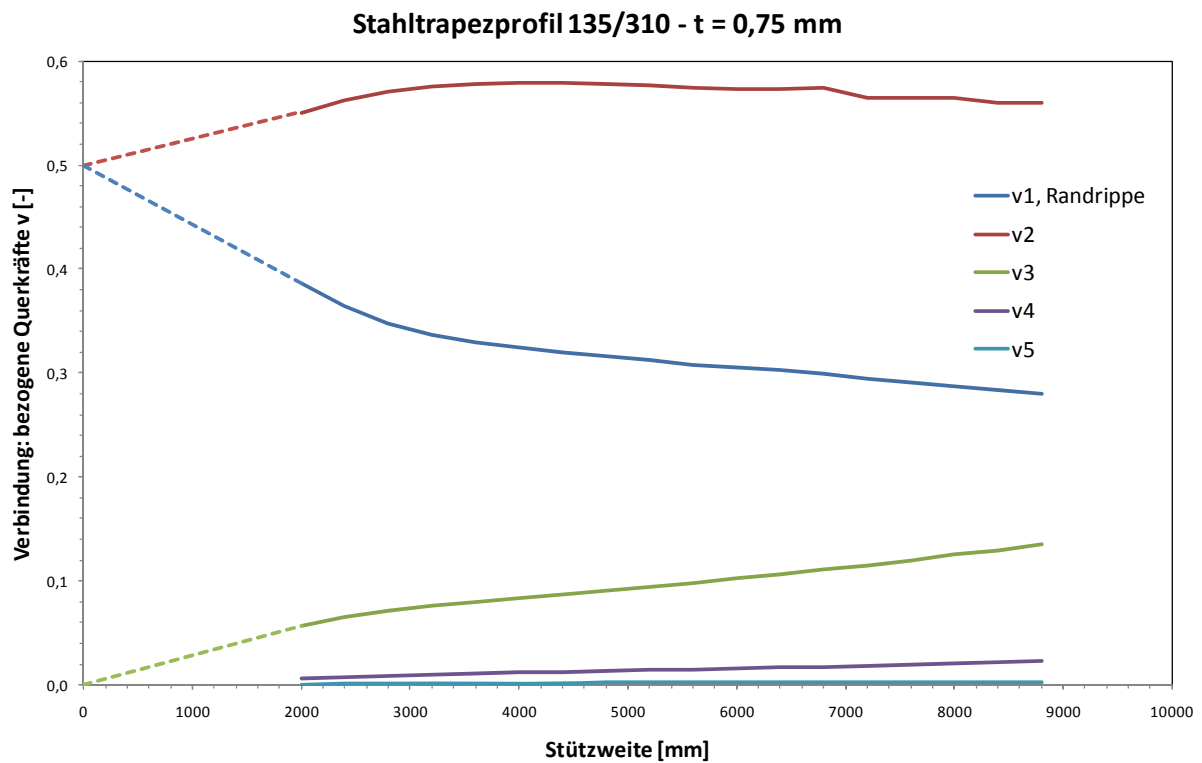
$$V_1 = V_2 = \frac{V}{2} = \frac{q \cdot L}{4} \quad \text{Gl. (6)}$$

Mit zunehmender Stützweite steigt  $V_2$  sehr schnell an, bleibt im für die praktische Anwendung relevanten Bereich nahezu konstant. Grundsätzlich ist die größte Querkraft am zweiten angeschlossenen Untergurt zu finden, was sich mit den Beobachtungen im Versuch deckt: Für das Versagen durch Lochleibung maßgebend war der zweite angeschlossene Untergurt. Mit zunehmender Stützweite werden weitere angeschlossene Rippen aktiviert, so dass im für die praktische Anwendung irrelevanten Bereich sehr großer Stützweiten der Anteil von  $V_2$  abnimmt.

Der Anteil von  $V_1$  nimmt mit der Stützweite kontinuierlich ab: mit zunehmender Stützweite verhält sich der äußere freie Untergurt immer weicher, da die Verdrehungen der Randrippe zunehmen. Diese „weiche Feder“ nimmt dadurch weniger Kräfte auf, weshalb am Auflager geringere Kräfte ankommen. Die Kräfte müssen stattdessen von den weiter innen liegenden Rippen aufgenommen werden. Hier nehmen damit die Auflagerkräfte zu. Im für die praktische Anwendung relevanten Bereich bedeutet dies, dass  $V_3$  zunimmt. Bei noch größeren Stützweiten ist auch ein Anstieg von  $V_4$  erkennbar. Mit zunehmender Steifigkeit (Steifigkeit als Querbiegesteifigkeit aus Rahmenwirkung der Querschnittsgeometrie und/oder Steifigkeit bei gleichbleibender Geometrie aus Blechdicke) findet die Umlagerung von  $V_1$  auf  $V_3$  schneller

statt: Die Steifigkeit ermöglicht die Kraftweiterleitung in die weiter vom freien Längsrand entfernten Rippen und damit in die Verbindungen der mit der Unterkonstruktion verbundenen Untergurte.

Bei Belastung in Richtung der Dachfläche (Winddruck Attika) erhält man nahezu identische Verläufe, vgl. Abbildung 37.



**Abbildung 37: Verteilung der Querkräfte über die Verbindungen („Winddruck Attika“)**

Durch eine Kopplung der Rippen im Obergurt, z.B. durch die im Rahmen der Finite-Element-Berechnungen untersuchten Flachbleche, werden die Auflagerkräfte  $V_i$  reduziert. Werden nur zwei Rippen gekoppelt, ist das grundsätzliche Verhalten mit dem bei Belastung einer einzelnen Randrippe vergleichbar. Die Auflagerkraft  $V_2$  ist weiterhin die größte. Der ansonsten nur im für die praktische Anwendung nicht relevanten Bereich der Stützweite erkennbare Abfall der Auflagerkraft  $V_2$  sowie die Zunahme von  $V_4$  treten schon bei kleineren praxisrelevanten Stützweiten ein. Bei Kopplung weiterer Rippen ergibt sich mit zunehmender Anzahl Kopplungen eine Vergleichmäßigung, vgl. Abbildung 38. Der äußere freie Untergurt erhält dabei allerdings nur die etwa 50% der Auflagerkraft der anderen Rippen.

Stahltrapezprofil 85/280 - t = 0,75 mm

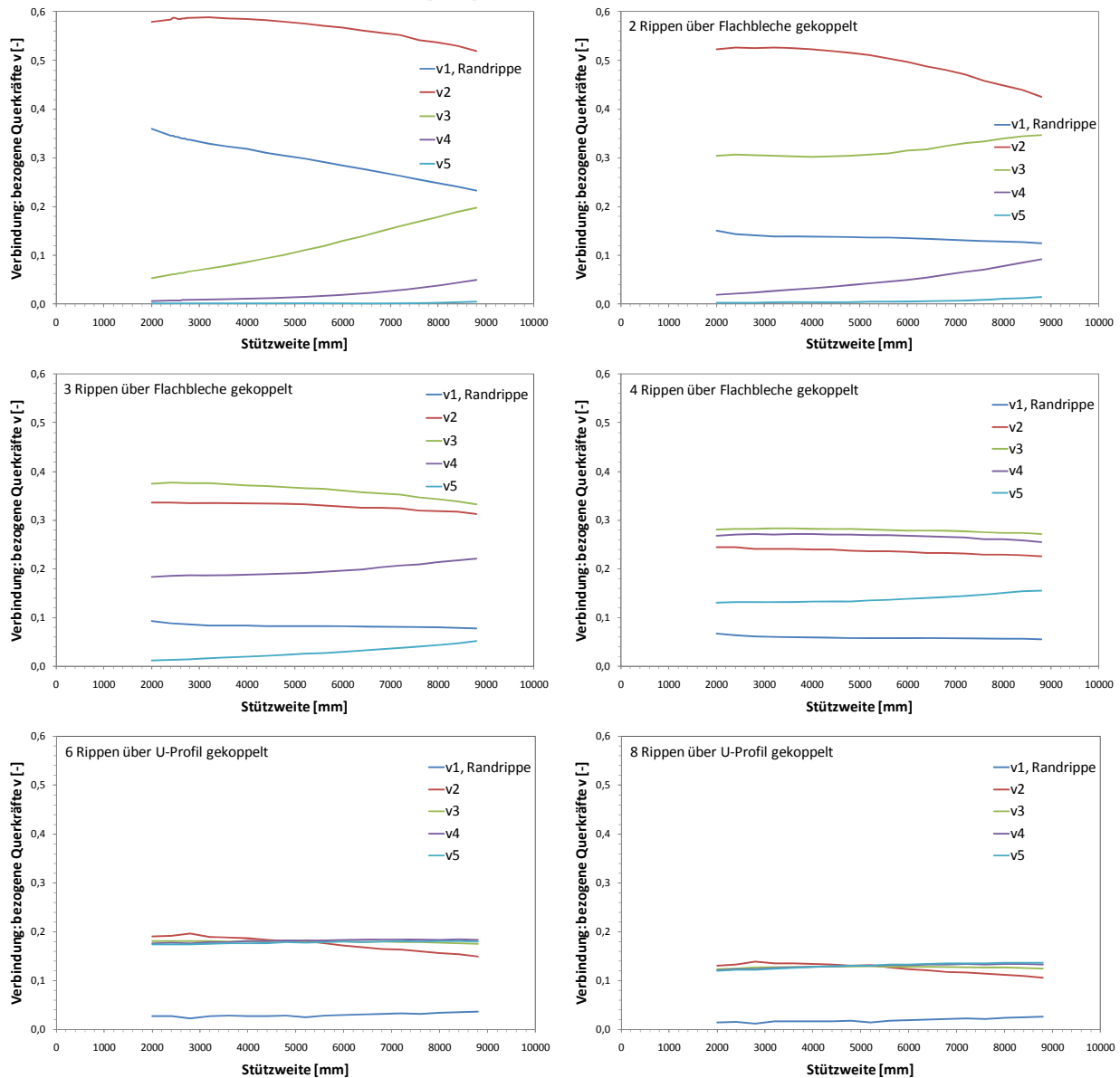


Abbildung 38: Verteilung der Querkräfte über die Verbindungen bei ungekoppelten und gekoppelten Rippen („Windsog Attika“)

6.3.3 Normalkräfte in den Schrauben

Erfolgt die Lasteinleitung ausschließlich in die äußere Rippe, ergeben sich aus der Belastung in Höhe des Obergurts in dem aus der Einzelrippe gebildeten Rahmentragwerk Zugkräfte in einem Rahmenstiel und Druckkräfte im anderen. Für dieses – infolge der Vernachlässigung des Mitwirkens der angrenzenden, nicht direkt belasteten Rippen - nur für sehr geringe Stützweiten gültigen Modell, lässt sich die Schraubenkraft direkt aus dem Verhältnis von Höhe und Rippenbreite ermitteln. Die Zugkräfte in den Schrauben betragen damit bei Belastung in Richtung des freien Längsrandes („Windsog Attika“)

$$N_1 = 0 \quad \text{Gl. (7)}$$

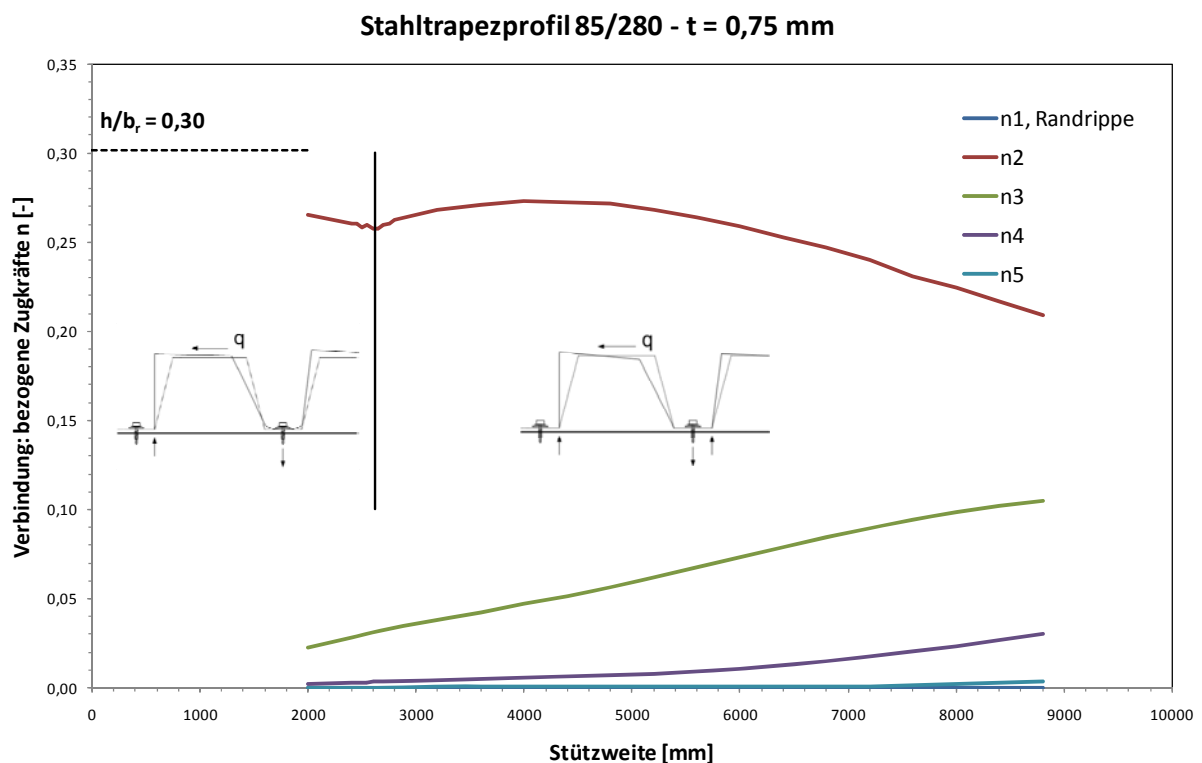
$$N_2 = \frac{h}{b_R} \cdot V \quad \text{Gl. (8)}$$

mit der Auflagerkraft

$$V = \frac{q \cdot L}{2} \quad \text{Gl. (9)}$$

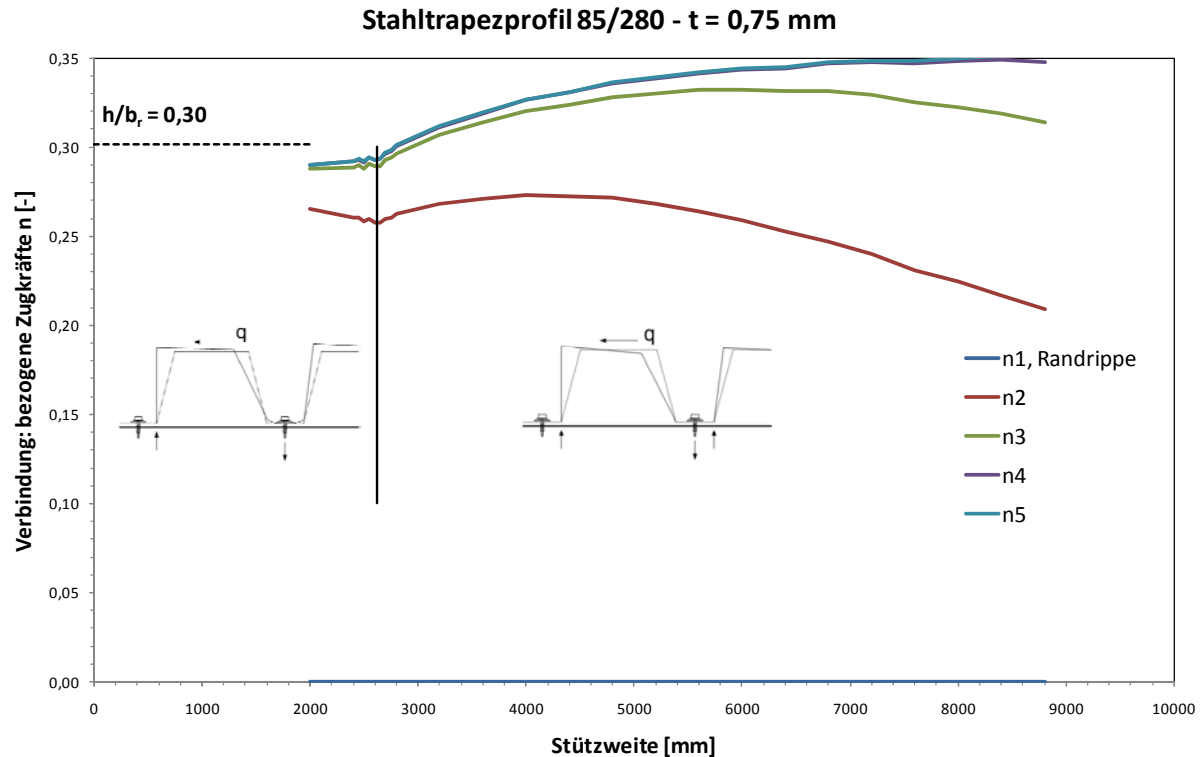
Bei Belastung in Richtung der Dachfläche („Winddruck Attika“) sind die Kräfte zu tauschen.

Mit zunehmender Stützweite tragen angrenzende Rippen mit, weshalb  $N_2$  zuerst absinkt und  $N_3$  dementsprechend zunimmt. Hierbei werden in der Nachbarrippe zuerst nur Zugkräfte in den Schrauben aktiviert (die Rippe wird insgesamt angehoben), mit zunehmender Stützweite findet aber ein Systemwechsel statt und infolge der Verdrehung der Nachbarrippe entstehen auch Druckkräfte im direkt an die Kraft  $N_2$  angrenzenden Steg.



**Abbildung 39: Verteilung der Zugkräfte über die Verbindungen („Windsog Attika“)**

Infolgedessen kommt es zu einem erneuten Anstieg der Zugkraft  $N_2$ , die aber immer unter dem Wert für  $L = 0$  nach Gl. (8) bleibt. Summiert man für jede Stützweite die Schraubenkräfte auf, so zeigt sich, dass es infolge des Systemwechsels zu einer Zunahme der Gesamtkräfte kommt. Die Ursache hierfür liegt in der zunehmenden Verdrehung der Rippen.



**Abbildung 40: Summation der Zugkräfte über die Verbindungen („Windsog Attika“)**

Auch hier gilt, dass mit zunehmender Steifigkeit (Steifigkeit als Querbiegesteifigkeit aus Rahmenwirkung der Querschnittsgeometrie und/oder Steifigkeit bei gleichbleibender Geometrie aus Blechdicke) die Umlagerung von  $N_2$  auf  $N_3$  (und ggf. weitere  $N_i$ ) schneller stattfindet (Abbildung 41), damit auch die Stützweite kleiner ist, bei der der Systemwechsel stattfindet und Druckkräfte  $R_2$  im Steg der Nachbarrippe entstehen.  $N_2$  bildet bei dieser Umlagerung aber eine Obergrenze für die auftretende Schraubenkraft, gegen die die anderen  $N_i$  mit zunehmender Stützweite streben, wie in Abbildung 42 für große, nicht mehr praxisrelevante Stützweiten, angedeutet.

Stahltrapezprofil 85/280 - t = 1,50 mm

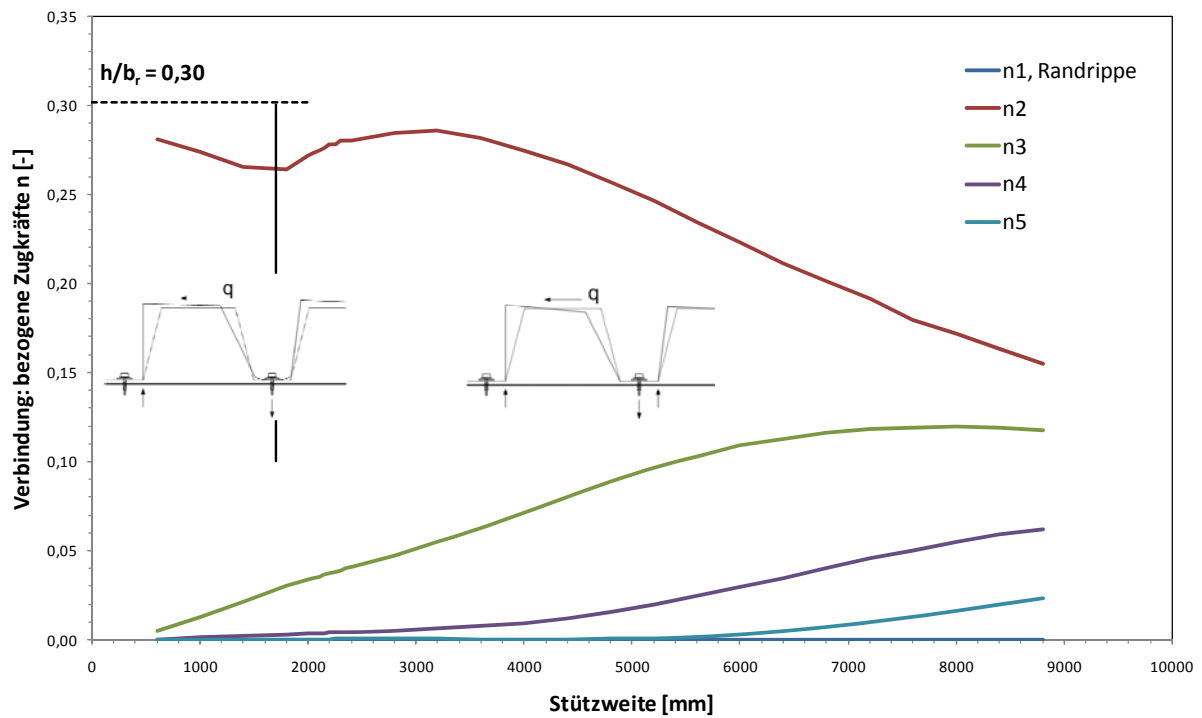


Abbildung 41: Verteilung der Zugkräfte über die Verbindungen („Windsog Attika“) bei größerer Blechdicke (vgl. Abbildung 39)

Stahltrapezprofil 85/280 - t = 0,75 mm

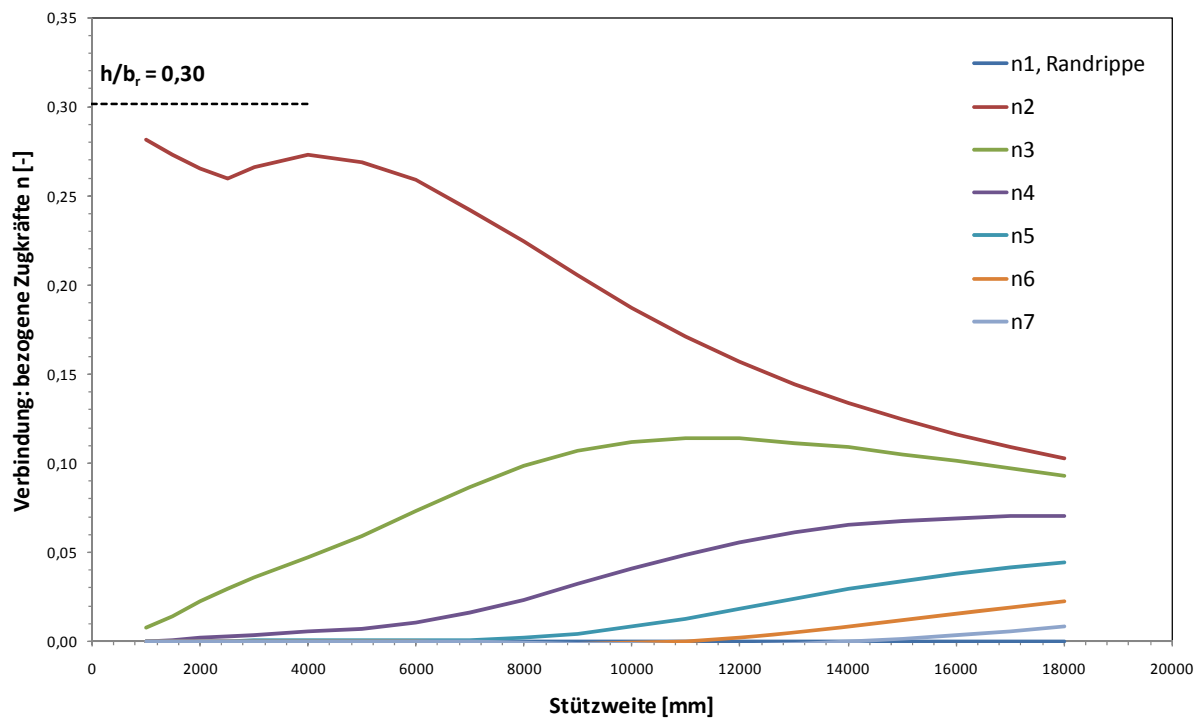


Abbildung 42: Verteilung der Zugkräfte über die Verbindungen („Windsog Attika“)

Durch eine Kopplung der Rippen im Obergurt, z.B. durch die im Rahmen der Finite-Element-Berechnungen untersuchten Flachbleche, werden die Zugkräfte  $N_i$  reduziert. Werden nur zwei Rippen gekoppelt, verformen sich diese in einer Weise zusammen, dass  $N_3$  die größte Zugkraft ist. Bei Kopplung weiterer Rippen ergibt sich mit zunehmender Anzahl Kopplungen eine Vergleichmäßigung, vgl. Abbildung 43. Während bei zunehmender Anzahl gekoppelter Rippen  $m$  die Kräfte  $N_3$  bis  $N_{m+1}$  etwa gleich groß sind, erreicht  $N_2$  nur etwa 60% dieses Wertes. Bei Belastung in Richtung des freien Längsrandes gilt offensichtlich in jedem Fall  $N_1 = 0$ .

Die Diagramme zeigen auch, dass der bei ungekoppelten Rippen beobachtete Systemwechsel nicht mehr stattfindet. Summiert man wiederum die Zugkräfte in den Schrauben auf, wie schon in Abbildung 40 dargestellt, so ist auch hier eine gegen einen Grenzwert laufende Zunahme der Gesamtschraubenkraft über die Stützweite erkennbar, wenn auch im relativ geringeren Maße als bei ungekoppelten Rippen (vgl. Abbildung 44). Der für zunehmende  $m$  vermutete Grenzwert  $K_3$  aus der Schubfeldbemessung (hier:  $K_3 = 0,42$ ) existiert offensichtlich nicht.



Stahltrapezprofil 85/280 - t = 0,75 mm

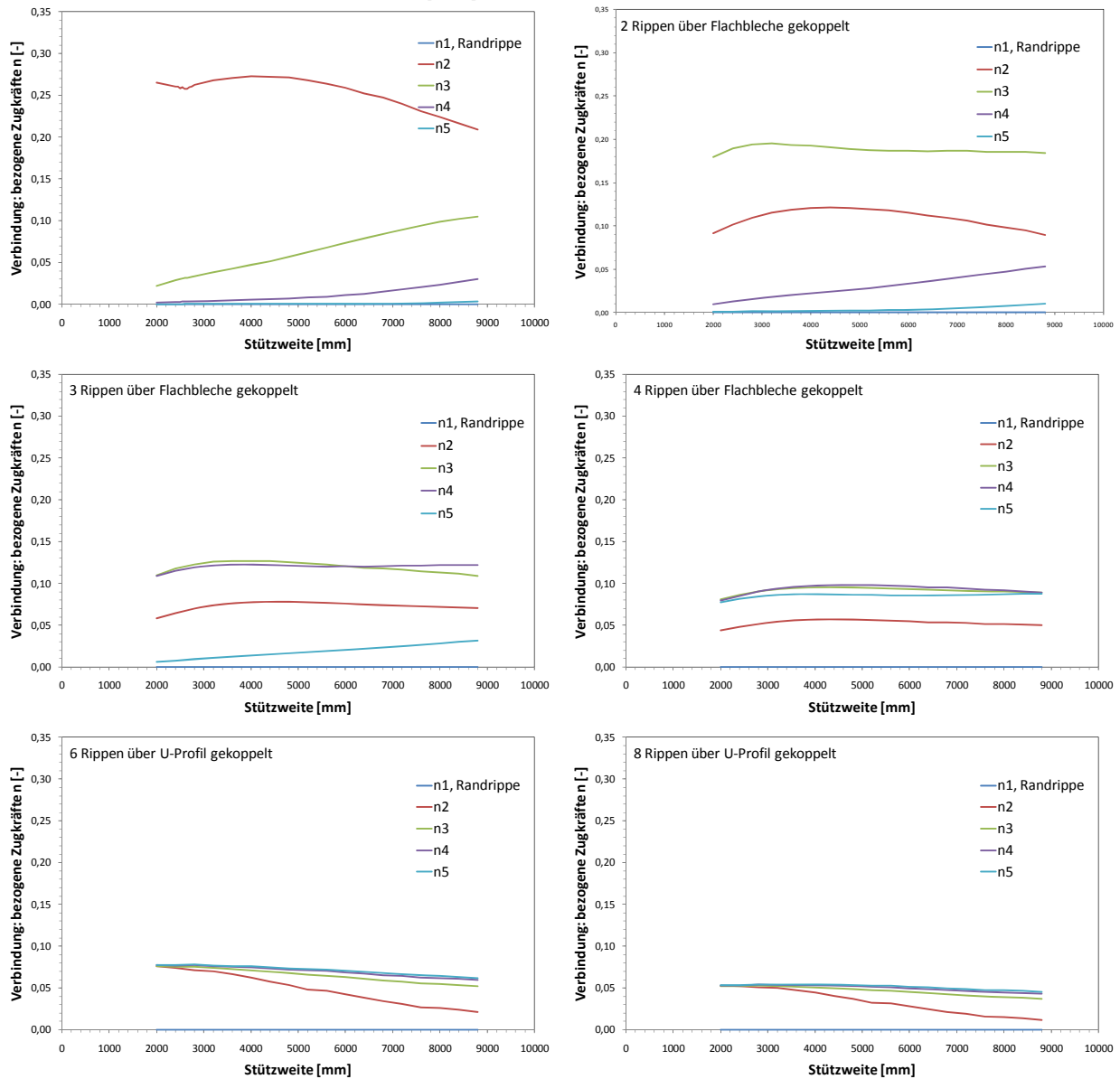
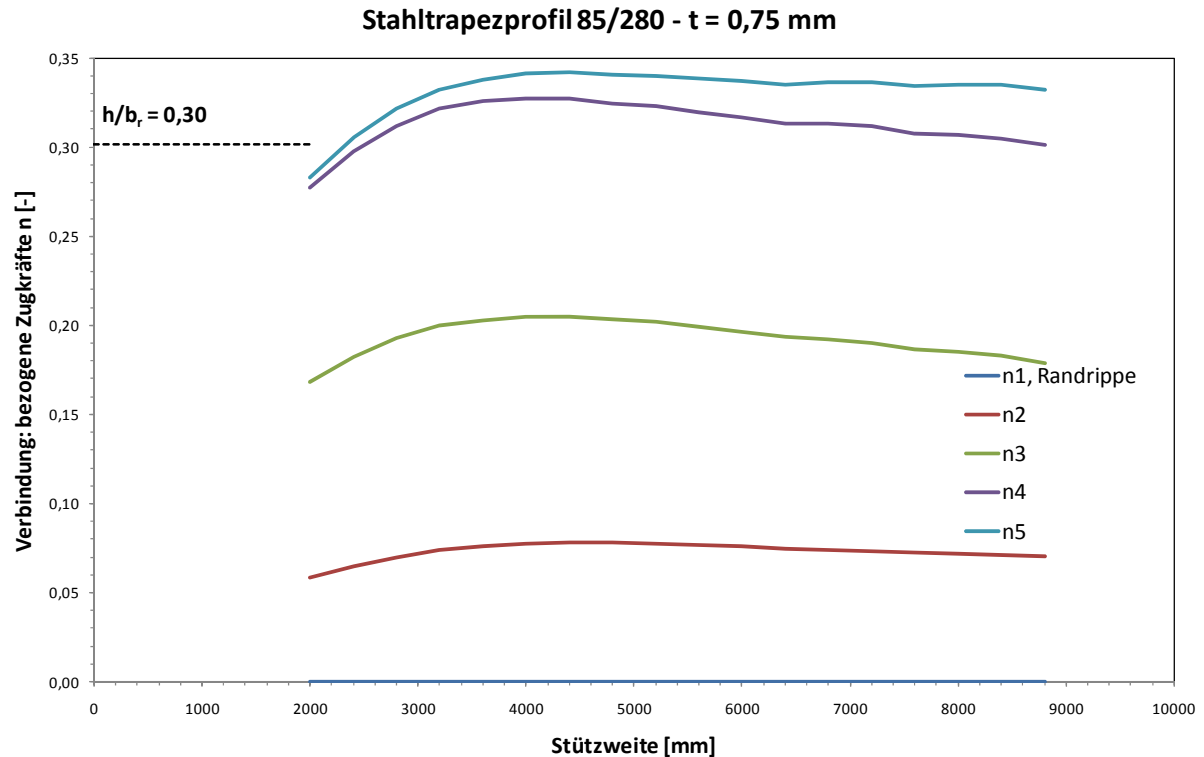


Abbildung 43: Verteilung der Zugkräfte über die Verbindungen bei ungekoppelten und gekoppelten Rippen („Windsog Attika“)



**Abbildung 44: Summation der Zugkräfte über die Verbindungen („Windsog Attika“) bei drei gekoppelten Rippen**

#### 6.3.4 Normalkräfte in den Stegen

Die Normalkräfte in den Stegen müssen zusammen mit den Zugkräften in den Schrauben das sich aus der Einleitung der Beanspruchung in den Obergurt ergebende Moment abtragen. Sie bilden mit diesen Zusammen ein Kräftepaar. Dementsprechend gelten für diese Kräfte die gleichen Zusammenhänge wie für die Normalkräfte in den Schrauben.

## 7 Tragfähigkeit am Auflager

### 7.1 Vorbemerkungen

Die Tragfähigkeit am Auflager wird sowohl durch die Tragfähigkeit der druckbeanspruchten Stege (Stegkrüppeln) als auch durch die Verbindungen begrenzt. Auf die Verbindungen wirken dabei sowohl Zug- als auch Querkkräfte, d.h. für diese ist ein Interaktionsnachweis erforderlich. Eine weitere Interaktion mit einer Biegebeanspruchung der Trapezprofile ist ggf. zu berücksichtigen.

Die Querschnittsverformung infolge Querbiegung wird im Rahmen der in Abschnitt 8 zusammengefassten Nachweise der Gebrauchstauglichkeit behandelt.

Unterstellt man, wie üblicherweise bei Schubfeldern, dass die Trapezprofile in Querrichtung biegeweich sind, so lassen sich Mehrfeldsysteme in Einfeldsysteme zerlegen. Finite-Elemente-Berechnungen ergaben, dass das tatsächliche Verhalten – und damit die Auflagerkräfte am Zwischenaufleger - stützweitenabhängig zwischen dem aus mehreren Einfeldträgern und dem aus einem Mehrfeldträger bestehenden System liegt. Bei Mehrfeldsystemen sind daher die Auflagerkräfte an den Zwischenauflagern entsprechend dem statischen System eines über mehrere Felder durchlaufenden Biegeträgers zu erhöhen. Eine explizite Behandlung von Mehrfeldsystemen ist damit nicht erforderlich.

### 7.2 Querkkräfte in den Verbindungen

Für die Beschreibung der auf die Verbindungen der einzelnen Rippen mit der Unterkonstruktion einwirkenden Querkkräfte wird der dimensionslose Parameter

$$v_i = \frac{V_i}{V} \quad \text{Gl. (10)}$$

für jede Rippe eingeführt. Der Index  $i$  bezieht sich dabei auf die vom freien Längsrand aus gezählte Rippe.  $V$  ist die gesamte am Auflager des Trapezprofils angreifende Kraft:

$$V = \frac{q_h \cdot L}{2} \quad \text{Gl. (11)}$$

Es gilt damit

$$\sum v_i = 1 \quad \text{Gl. (12)}$$

für jedes Auflager. Die Unsicherheit in der Ermittlung der tatsächlichen, von der Stützweite, der Profilgeometrie und der Blechdicke abhängigen Verteilung der Auflagerkräfte lässt sich nur durch Vereinfachungen abdecken, so dass gilt

$$\sum v_i \geq 1 \quad \text{Gl. (13)}$$

Wie in Abschnitt 5 gezeigt, fällt die Querkraft  $V_1$  an der äußeren freien Rippe in etwa linear mit der Stützweite  $L$  ab. Die Querkraft  $V_3$  an der Befestigung der dritten Rippe nimmt etwa in gleichem Maße zu. Für den betrachteten Bereich mit Stützweiten bis  $L = 9,0$  m spielt  $V_4$  noch keine signifikante Rolle, d.h. an der vierten Rippe sind konstruktive Maßnahmen ausreichend. Die Querkraft  $V_2$  bleibt über den untersuchten Stützweitenbereich nahezu konstant.

Für Systeme ohne Kopplung von Rippen kann vereinfachend

$$v_2 = 0,6 \quad \text{Gl. (14)}$$

angesetzt werden. Dieser Wert liegt nur geringfügig über den im Rahmen der Finite-Element-Berechnungen für den praktisch relevanten Bereich der Stützweiten ermittelten Werten, dennoch aber auf der sicheren Seite. Für  $V_1$  und  $V_3$  gilt damit

$$v_1 + v_3 = 0,4 \quad \text{Gl. (15)}$$

Der Wert  $v_1 = 0,4$  ergibt sich auch, wenn man den Verlauf von  $v_1$  im praktisch relevanten Stützweitenbereich durch eine Gerade ersetzt. Dies bedeutet für die einzelnen Anteile

$$v_1 \leq 0,4 \quad \text{Gl. (16)}$$

$$v_3 \leq 0,4 \quad \text{Gl. (17)}$$

Setzt man diese mit ihrem Größtwert an, erhält man damit

$$\sum v_i = 1,4 \quad \text{Gl. (18)}$$

d.h. eine Überbemessung.

Erfolgt eine Kopplung von Rippen der Anzahl  $m$  z.B. über Flachbleche oder U-Profile so lassen sich die Querkräfte wie folgt abschätzen: Für die Befestigung des äußeren freien Untergurt ergibt sich

$$v_1 \leq \frac{0,8}{2 \cdot m} \quad \text{Gl. (19)}$$

Für die Untergurte, die durch die Flachbleche oder U-Profile abgedeckt sind, erhält man

$$v_2 \dots v_m \leq \frac{1,2}{m} \quad \text{Gl. (20)}$$

und für die Auflagerkraft des direkt an die Kopplungen anschließenden Untergurtes

$$v_{m+1} \leq \frac{1,2}{2 \cdot m} \quad \text{Gl. (21)}$$

Da mit zunehmender Stützweite auch nicht gekoppelte Rippen Lasten zum Auflager abtragen, sollte – entsprechend dem Vorgehen bei Systemen ohne Kopplung von Rippen – die Befestigung eines weiteren Untergurtes für die Aufnahme von Querkräften der Größe

$$v_{m+2} \leq \frac{0,8}{2 \cdot m} \quad \text{Gl. (22)}$$

aus der Horizontallast nachgewiesen werden. Auch bei der Kopplung der Rippen ergibt sich dadurch eine Überbemessung, da

$$\sum v_i = 1,2 + \frac{0,2}{m} \quad \text{Gl. (23)}$$

die jedoch mit zunehmender Anzahl gekoppelter Rippen abnimmt und damit der Vergleichmäßigung der Auflagerkräfte  $V_i$  Rechnung trägt. Setzt man für Systeme ohne Kopplung von Rippen  $m = 1$  und vernachlässigt Gl. (20), so gehen die Konzepte für die Ermittlung der Querkräfte am Auflager ineinander über.

### 7.3 Zugkräfte in den Verbindungen

Für die Beschreibung der auf die Verbindungen der einzelnen Rippen mit der Unterkonstruktion einwirkenden Zugkräfte wird der dimensionslose Parameter

$$n_i = \frac{N_i}{V} \quad \text{Gl. (24)}$$

für jede Rippe eingeführt. Der Index  $i$  bezieht sich dabei auf die vom freien Längsrand aus gezählte Rippe.  $V$  ist die gesamte am Auflager des Trapezprofils angreifende Kraft:

$$V = \frac{q_h \cdot L}{2} \quad \text{Gl. (25)}$$

Aufgrund der Rahmentragwirkung gilt damit näherungsweise

$$\sum n_i = \frac{h}{b_R} \quad \text{Gl. (26)}$$

für jedes Auflager. Die Unsicherheit in der Ermittlung der tatsächlichen, von der Stützweite, der Profilgeometrie und der Blechdicke abhängigen Verteilung der Auflagerkräfte lässt sich nur durch Vereinfachungen abdecken, so dass gilt

$$\sum n_i \geq \frac{h}{b_R} \quad \text{Gl. (27)}$$

Dies ist auch deswegen erforderlich, da sich infolge der Verdrehung der Rippen in der Summe erhöhte Zugkräfte in den Schrauben ergeben, vgl. Abbildung 40 und Abbildung 44, so dass bei ungekoppelten Rippen (Abbildung 40) mindestens

$$\sum n_i = 1,17 \cdot \frac{h}{b_R} \quad \text{Gl. (28)}$$

und bei drei gekoppelten Rippen (Abbildung 44) mindestens

$$\sum n_i = 1,13 \cdot \frac{h}{b_R} \quad \text{Gl. (29)}$$

gelten muss. Für weiter zunehmende Anzahl  $m$  gekoppelter Rippen geht die Summe dann in Gl. (26) über. Für eine Belastung in Richtung des freien Längsrandes erhält man damit

$$n_1 = 0 \quad \text{Gl. (30)}$$

und

$$n_2 \dots n_{m+1} = \frac{h}{b_R} \cdot \frac{1}{m-1} \quad \text{Gl. (31)}$$

Für die entgegengesetzte Belastung in Richtung der Dachfläche gilt

$$n_1 \dots n_m = \frac{h}{b_R} \cdot \frac{1}{m-1} \quad \text{Gl. (32)}$$

und

$$n_{m+1} = 0 \quad \text{Gl. (33)}$$

Es ergibt sich dann für jede Belastungsrichtung eine Überbemessung, da

$$\sum n_i = \frac{h}{b_R} \cdot \frac{m}{m-1} \quad \text{Gl. (34)}$$

die jedoch mit zunehmender Anzahl gekoppelter Rippen abnimmt und damit der Vergleichmäßigung der Zugkräfte  $N_i$  Rechnung trägt.

#### 7.4 Interaktion

Auf die Verbindungselemente wirken sowohl Quer- als auch Längskräfte. Für den Nachweis der Verbindungen ist daher ein Interaktionsnachweis erforderlich.

#### 7.5 Stegkrüppeln

Für die Druckkräfte in den Stegen wird der dimensionslose Parameter

$$r_i = \frac{R_i}{V} \quad \text{Gl. (35)}$$

für jede Rippe eingeführt. Der Index  $i$  bezieht sich dabei auf die vom freien Längsrand aus gezählte Rippe.  $V$  ist die gesamte am Auflager des Trapezprofils angreifende Kraft:

$$V = \frac{q_h \cdot L}{2} \quad \text{Gl. (36)}$$

Aufgrund der Rahmentragwirkung gilt wie bei den korrespondierenden Zugkräften in den Schrauben näherungsweise

$$\sum r_i = \frac{h}{b_R} \quad \text{Gl. (37)}$$

für jedes Auflager. Dementsprechend erhält man damit für eine Belastung in Richtung des freien Längsrandes

$$r_1 \dots r_m = \frac{h}{b_R} \cdot \frac{1}{m-1} \quad \text{Gl. (38)}$$

Für die entgegengesetzte Belastung in Richtung der Dachfläche gilt

$$r_1 = 0 \quad \text{Gl. (39)}$$

und

$$n_2 \dots n_{m+1} = \frac{h}{b_R} \cdot \frac{1}{m-1} \quad \text{Gl. (40)}$$

Es ergibt sich dann für jede Belastungsrichtung eine Überbemessung, da

$$\sum r_i = \frac{h}{b_R} \cdot \frac{m}{m-1} \quad \text{Gl. (41)}$$

die jedoch mit zunehmender Anzahl gekoppelter Rippen abnimmt und damit der Vergleichmäßigung der Auflagerkräfte  $R_i$  Rechnung trägt.

#### 7.6 Tragfähigkeit des Profilquerschnitt

Infolge der Einleitung der Beanspruchung in den Obergurt der Trapezprofile kommt es zu einer Momentenbeanspruchung in den Eckbereichen. Die daraus resultierenden Biegespannungen müssen begrenzt werden. Rahmenmodelle, wie z.B. in [4] präsentiert, stellen eine Möglichkeit für die Berechnung der Spannungen dar, wobei dabei die Spannungskonzentration über dem Auflager vernachlässigt wird (Abbildung 45): Das ebene Modell unterstellt eine gleichbleibende Spannung in Profillängsrichtung. Wird die Verdrehung durch konstruktive Maßnahmen reduziert (z.B. durch Kopplung von Rippen), ergibt sich das Problem, dass in Abhängigkeit von der Art der Kopplung die Anteile der einzelnen Rippen an der Lastabtragung nicht bekannt sind. Werden die horizontalen Beanspruchungen  $q_n$  vollständig auf der ersten Rippe angesetzt, stellt das Rahmenmodell aus [4] in Verbindung mit einer (auch diskreten) Kopplung von mindestens vier Rippen einen konservativen Ansatz dar.

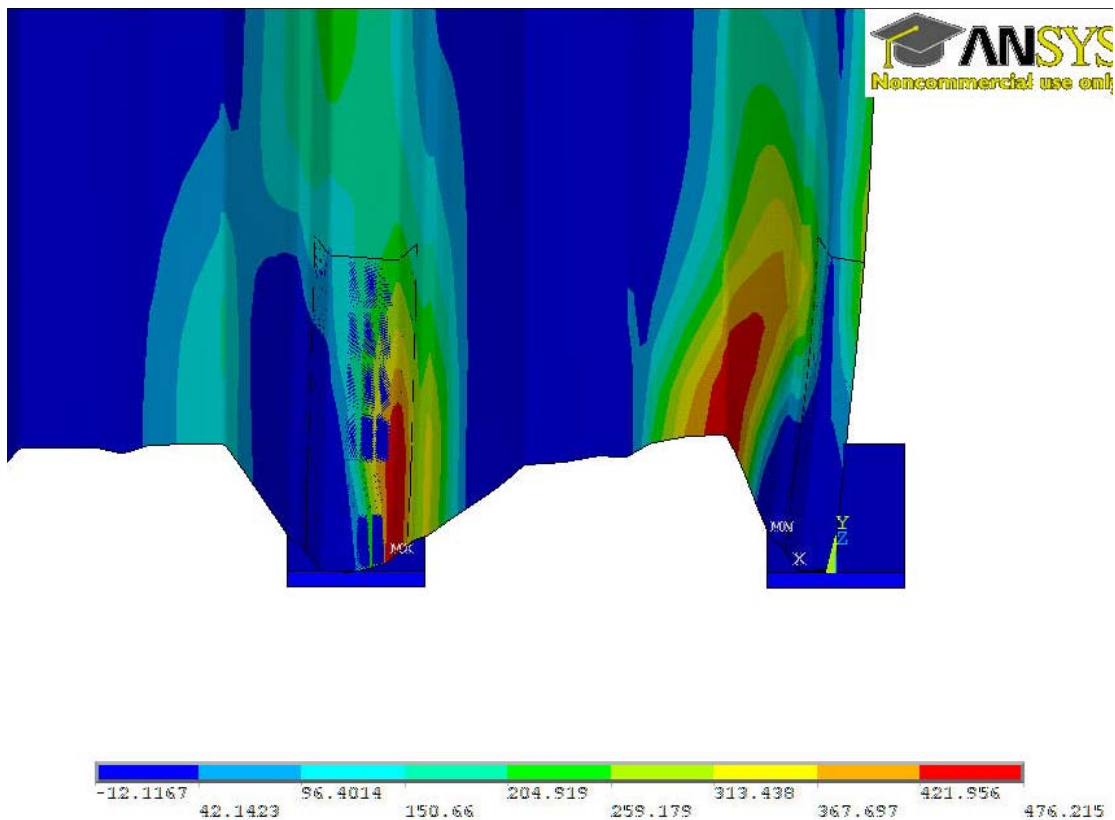


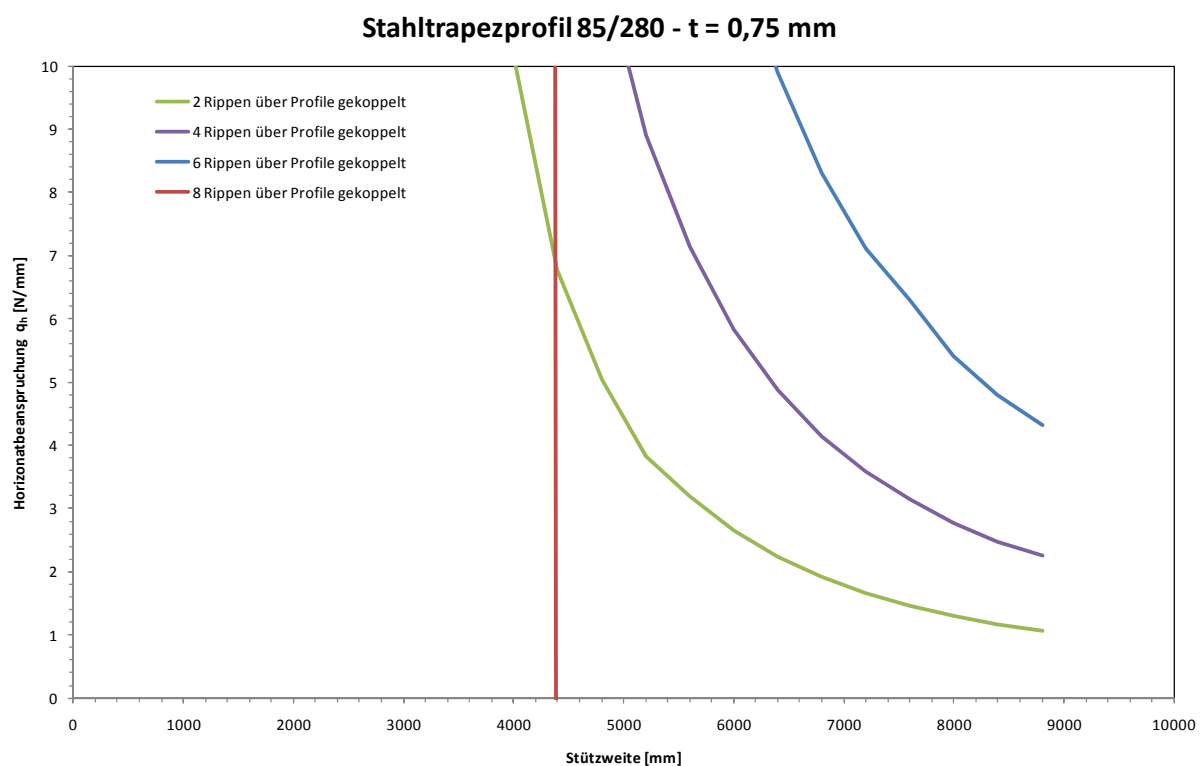
Abbildung 45: Hauptspannungen an den Eckradien über dem Auflager bei nicht durch Kopplungen ausgesteiften Rippen.



## 8 Gebrauchstauglichkeit

### 8.1 Verdrehung

Die Verdrehung der Rippen äußert sich vorwiegend in einer Verschiebung  $u_y$ , d.h. einer Durchbiegung des freien Profillängsrandes. Diese Verschiebungen müssen in Abhängigkeit vom Dachaufbau begrenzt werden. Berechnet man mittels Gl. (3) die horizontale Beanspruchung, bei der die Durchbiegung unter  $L/150$  bleibt, so ergibt sich für die untersuchten unterschiedlichen Profilquerschnitte, Blechdicken und Stützweiten bei einer diskreten, biegesteifen Kopplung über U-Profile bei  $L/4$  das in den folgenden Diagrammen zusammengestellt Bild.



**Abbildung 46: Horizontale Beanspruchung  $q_h$  [N/mm] für Einhaltung einer Durchbiegungsbeschränkung von  $u_y = L/150$  – Stahltrapezprofil 85/280 – t = 0,75 mm**

Stahltrapezprofil 85/280 - t = 1,00 mm

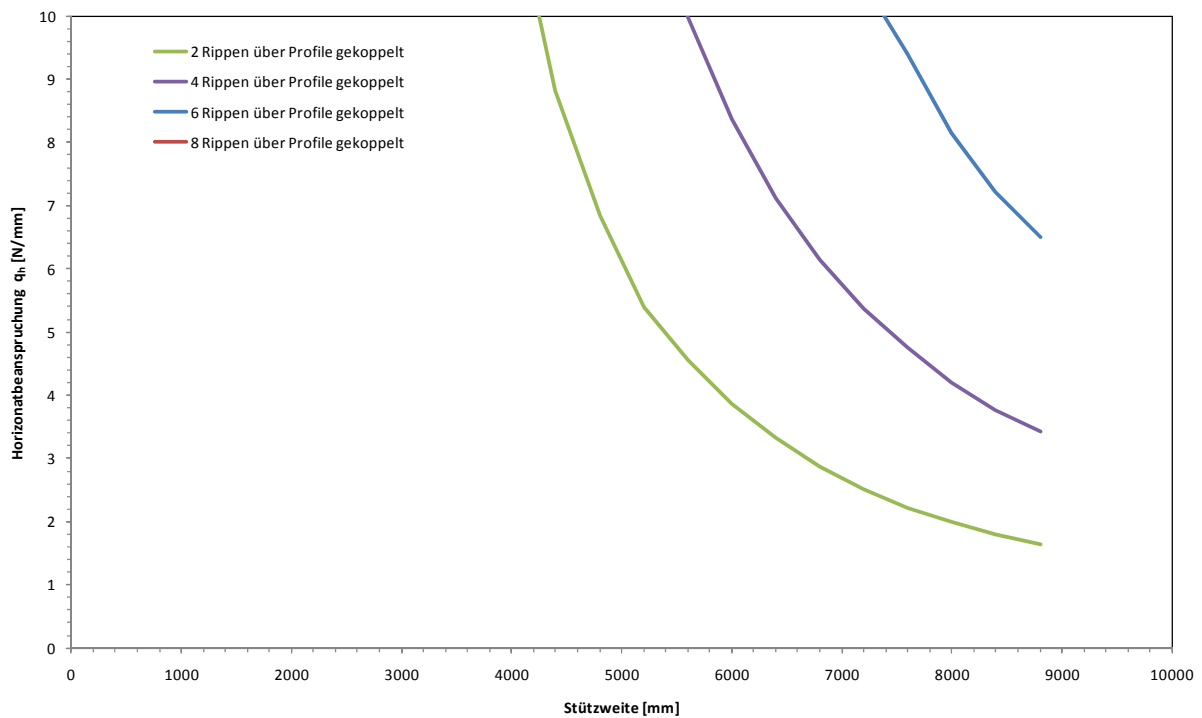


Abbildung 47: Horizontale Beanspruchung  $q_h$  [N/mm] für Einhaltung einer Durchbiegungsbeschränkung von  $u_y = L/150$  – Stahltrapezprofil 85/280 – t = 1,00 mm

Stahltrapezprofil 85/280 - t = 1,25 mm

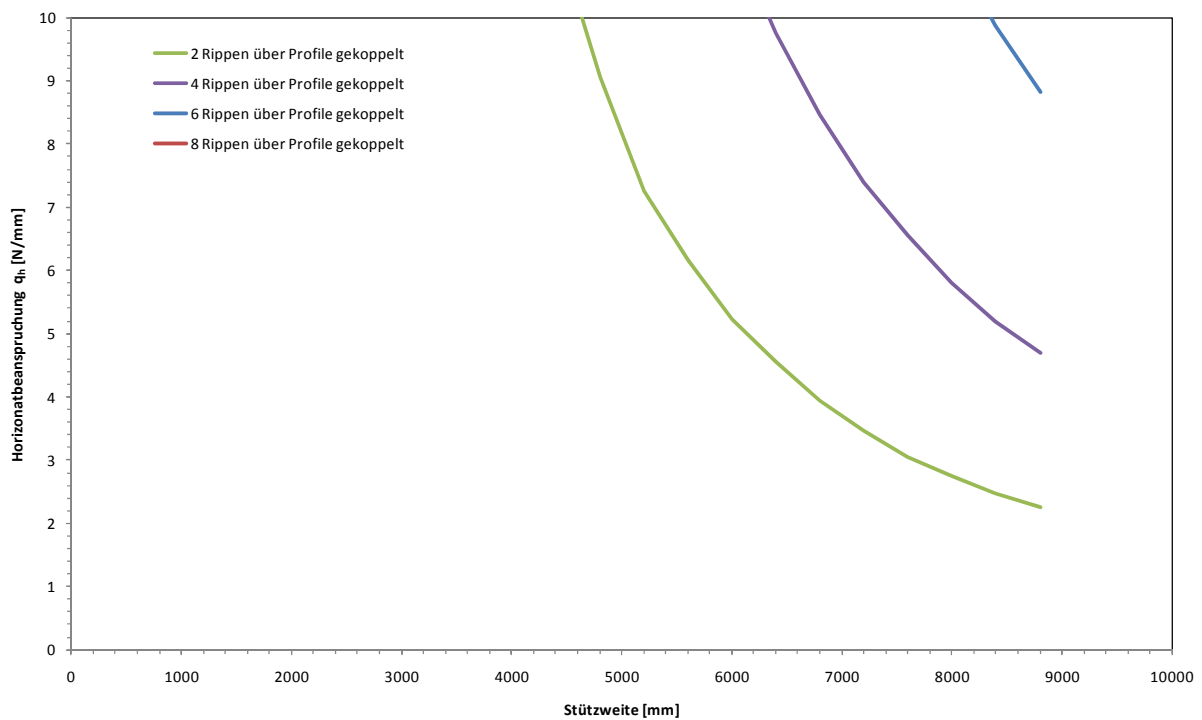


Abbildung 48: Horizontale Beanspruchung  $q_h$  [N/mm] für Einhaltung einer Durchbiegungsbeschränkung von  $u_y = L/150$  – Stahltrapezprofil 85/280 – t = 1,25 mm

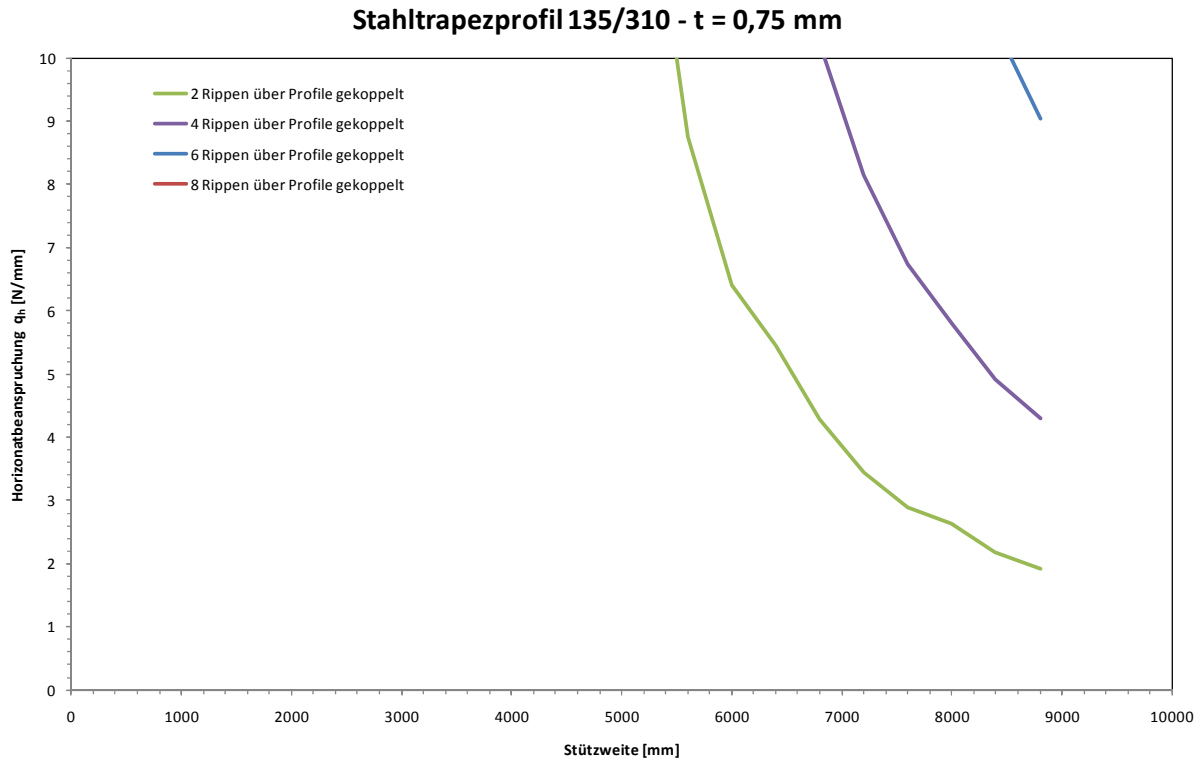


Abbildung 49: Horizontale Beanspruchung  $q_h$  [N/mm] für Einhaltung einer Durchbiegungsbeschränkung von  $u_y = L/150$  – Stahltrapezprofil 135/310 – t = 0,75 mm

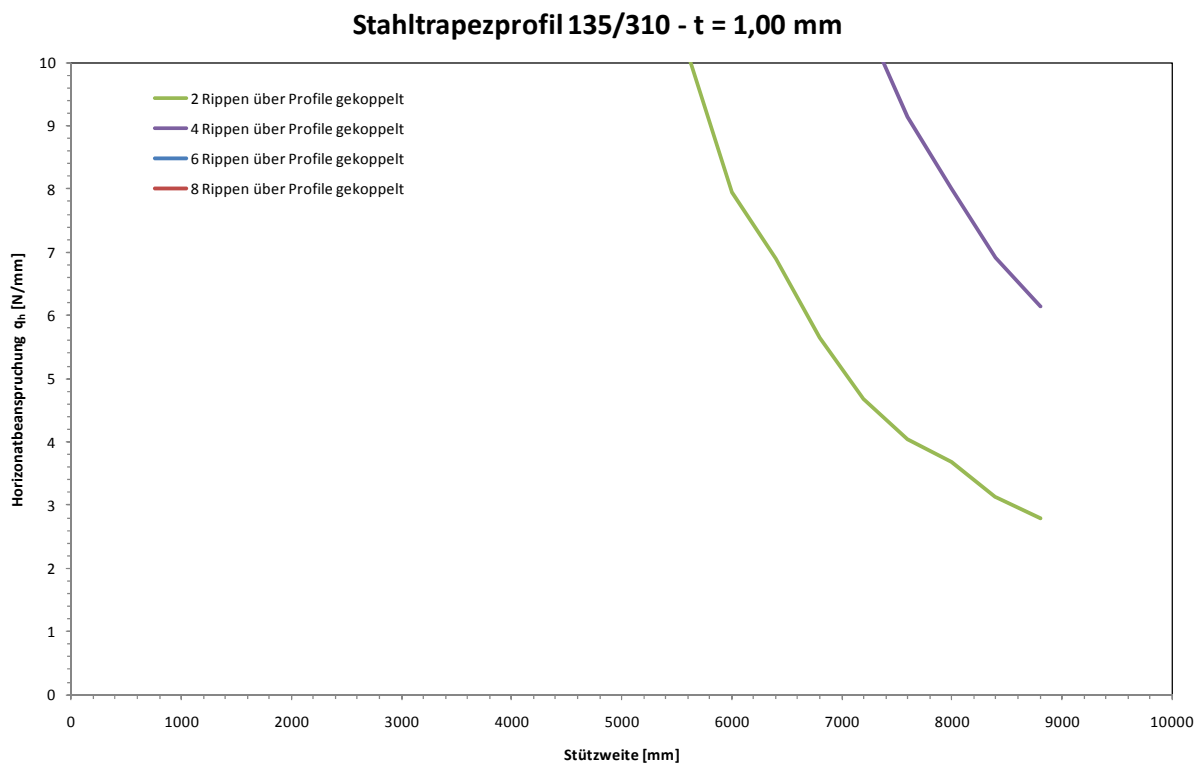
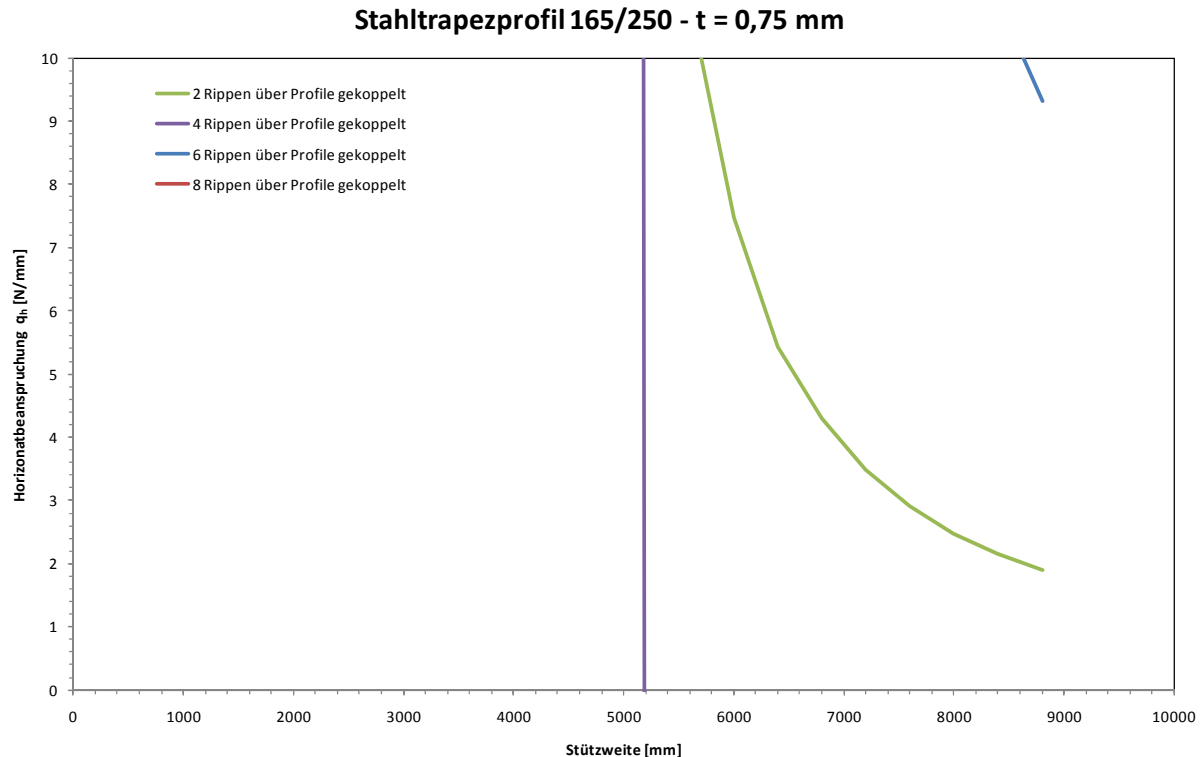


Abbildung 50: Horizontale Beanspruchung  $q_h$  [N/mm] für Einhaltung einer Durchbiegungsbeschränkung von  $u_y = L/150$  – Stahltrapezprofil 135/310 – t = 1,00 mm



**Abbildung 51: Horizontale Beanspruchung  $q_h$  [N/mm] für Einhaltung einer Durchbiegungsbeschränkung von  $u_y = L/150$  – Stahltrapezprofil 165/250 – t = 0,75 mm**

Es zeigt sich, dass bei Kopplung von mindestens vier Rippen schon sehr hohe horizontale Beanspruchungen eingeleitet werden können. Mit zunehmender Biegesteifigkeit des Profils reduziert sich das Problem weiter. Die Interaktion mit Beanspruchungen rechtwinklig zur Dachfläche ist durch

$$\bar{q}_h = q_h \cdot \left( 1 - 150 \cdot \frac{u_{y,g}}{l} \right) \quad \text{Gl. (42)}$$

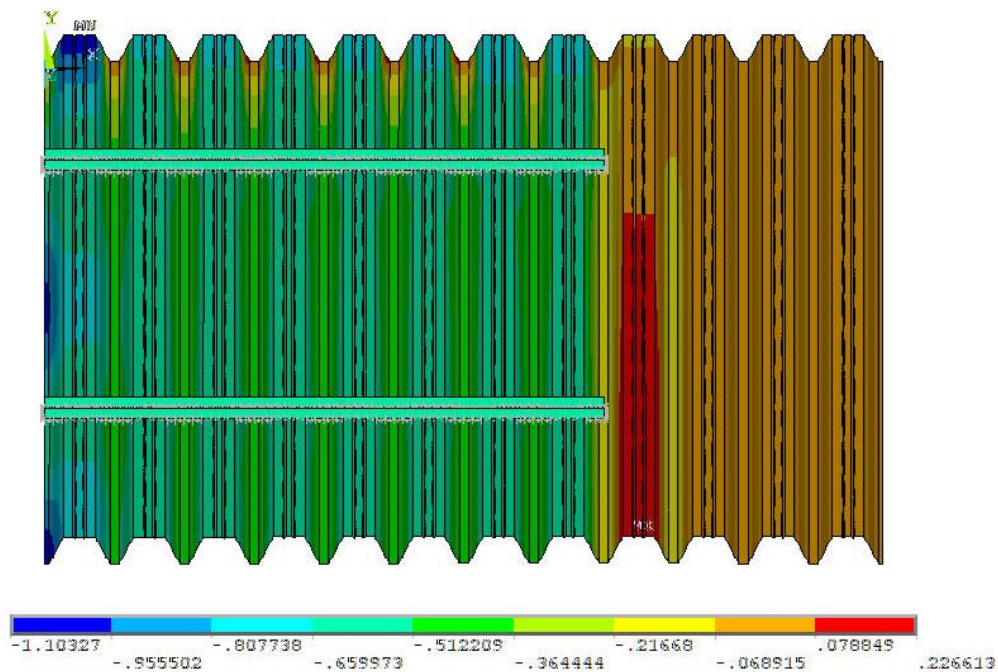
mit der Durchbiegung  $u_{y,g}$  aus der Beanspruchungen rechtwinklig zur Dachfläche zu berücksichtigen.

Die angegebenen horizontalen Beanspruchungen halbieren sich bei der bei Warmdächern (Folien- oder Bitumendächern) erhobenen Forderung von  $u_y = L/300$ , so dass hier eine Kopplung von mindestens sechs Rippen sinnvoll werden kann.

## 8.2 Querbiegung

Infolge der Einleitung der Beanspruchung in den Obergurt kommt es zu einer Verschiebung des Gurtes in Beanspruchungsrichtung. Auch diese Verschiebungen müssen in Abhängigkeit vom Dachaufbau begrenzt werden. Rahmenmodelle, wie z.B. in [4] präsentiert, vernachlässigen den Einfluß der Verdrehung der Rippen auf diese Verschiebungen. Wird die Verdrehung durch konstruktive Maßnahmen reduziert (z.B. durch Kopplung von Rippen), ergibt sich das Problem, dass in Abhängigkeit von der Art der Kopplung die Anteile der einzelnen Rippen an

der Lastabtragung nicht bekannt sind. Erfolgt eine biegesteife Kopplung durch U-Profile an diskreten Stellen zur Reduzierung der Verdrehungen, so reduzieren sich die Verschiebungen in Belastungsrichtung vorwiegend im Bereich der U-Profile. Am Auflager, insbesondere an der Randrippe werden die Verschiebungen dadurch weit weniger reduziert (Abbildung 52). Werden die horizontalen Beanspruchungen  $q_h$  vollständig auf der ersten Rippe angesetzt, stellt das Rahmenmodell aus [4] in Verbindung mit einer (auch diskreten) Kopplung von mindestens vier Rippen einen konservativen Ansatz dar, der – wie Berechnungen zeigten – auch die Verschiebungen aus der Verdrehung mit abdeckt.



**Abbildung 52: Reduktion der Verschiebungen  $u_x$  im Bereich der Kopplungen**

## 9 Zusammenfassung

Im Rahmen dieses Forschungsprojektes wurden Versuche sowie Berechnungen mit der Methode der Finiten Elemente zur Ermittlung des Trag- und Verformungsverhaltens der Trapezprofile bei Einleitung einer Horizontallast durchgeführt.

Die Untersuchungen lassen sich wie folgt zusammenfassen:

- Durch die Einleitung der Beanspruchung in den Obergurt ergeben sich sowohl Verschiebungen in Beanspruchungsrichtung (Rahmensystem) als auch rechtwinklig davon. Letztgenannte Verschiebungen resultieren aus der Verdrehung der Rippen. Durch Kopplung der Rippen lassen sich die Verschiebungen und Verdrehungen begrenzen. Um die Verschiebungen auf ein vertretbares Maß zu reduzieren, sind mindestens  $m = 4$  Rippen, bei Folien- oder Bitumendächern mindestens  $m = 6$  Rippen zu koppeln. Eine Ermittlung der auftretenden Verschiebungen über einfache Handrechenmodelle ist aufgrund der komplexen geometrischen Situation und der Vielzahl an konstruktiven Möglichkeiten der Kopplung mit unterschiedlichen Tragmechanismen nicht möglich. Eine Alternative stellen numerische Berechnungsverfahren dar.
- Die Problematik der Verdrehung der Rippen verschärft sich bei Einleitung der Kräfte mit einem Hebelarm, z.B. bei der Einleitung von Dachschub aus der Außenschale. Hier führt auch die Kopplung von sechs oder mehr Rippen nicht zu vertretbar kleinen Verschiebungen. Vielmehr muss das entstehende Moment durch Vertikalkräfte abgetragen werden. Für die Horizontalkräfte gelten dann die hier zusammengefaßten Ansätze.
- Um auch unter Druckbelastung wirksam zu sein sollte die Kopplung der Rippen biegesteif sein. Flachblechtafeln erfüllen diese Anforderung nicht. U-Profile (z.B. Kantprofile 50/100/3) oder L-Profile (z.B. Kantprofile 50/50/3) sind trotz der Probleme bei der Einbindung in den Dachaufbau vorzuziehen.
- Das Trapezprofil allein ist nicht in der Lage, für eine gleichmäßige Verteilung der Kräfte über die einzelnen angeschlossenen Rippen zu sorgen. Für eine gleichmäßige Verteilung ist eine Kopplung von mindestens  $m = 3$  Rippen erforderlich. Diese Forderung ist durch die o.g. konstruktiven Forderungen bereits erfüllt.
- Die Verbindungen sind für Beanspruchungen aus Zug- und Querkraft zu bemessen. Bei einer Belastung in Richtung des freien Längsrandes sind diese für Zugbeanspruchungen

$$n_1 = 0 \quad \text{Gl. (30)}$$

und

$$n_2 \dots n_{m+1} = \frac{h}{b_R} \cdot \frac{1}{m-1} \quad \text{Gl. (31)}$$

zu bemessen. Für die entgegengesetzte Belastung in Richtung der Dachfläche gilt

$$n_1 \dots n_m = \frac{h}{b_R} \cdot \frac{1}{m-1} \quad \text{Gl. (32)}$$

und

$$n_{m+1} = 0 \quad \text{Gl. (33)}$$

Unabhängig von der Belastungsrichtung ergibt sich für die Querkraftbeanspruchung des äußeren freien Untergurt

$$v_1 = \frac{0,8}{2 \cdot m} \quad \text{Gl. (19)}$$

und für die Untergurte, die durch die Flachbleche oder U-Profile gekoppelt sind

$$v_2 \dots v_m = \frac{1,2}{m} \quad \text{Gl. (20)}$$

Die Verbindung des direkt an die Kopplungen anschließenden Untergurtes ist für

$$v_{m+1} = \frac{1,2}{2 \cdot m} \quad \text{Gl. (21)}$$

zu bemessen. Da mit zunehmender Stützweite auch nicht gekoppelte Rippen Lasten zum Auflager abtragen, sollte die Befestigung eines weiteren Untergurtes für die Aufnahme von Querkraften der Größe

$$v_{m+2} = \frac{0,8}{2 \cdot m} \quad \text{Gl. (22)}$$

nachgewiesen werden.

Die aufgeführten Beanspruchungen sind mit den Beanspruchungen aus Windsog auf die Dachfläche zu überlagern. Ein Interaktionsnachweis ist zu führen.

- Die Stege sind für die Auflagerkräfte gegen Stegkrüppeln zu bemessen. Für eine Belastung in Richtung des freien Längsrandes erhält man

$$r_1 \dots r_m = \frac{h}{b_R} \cdot \frac{1}{m-1} \quad \text{Gl. (43)}$$

Für die entgegengesetzte Belastung in Richtung der Dachfläche gilt

$$r_1 = 0 \quad \text{Gl. (44)}$$

und

$$n_2 \dots n_{m+1} = \frac{h}{b_R} \cdot \frac{1}{m-1} \quad \text{Gl. (45)}$$

Die aufgeführten Beanspruchungen sind mit den Beanspruchungen aus Winddruck und Schnee auf die Dachfläche zu überlagern.

- Bei Mehrfeldsystemen sind die Auflagerkräfte an den Zwischenauflagern entsprechend dem statischen System eines über mehrere Felder durchlaufenden Biegeträgers zu erhöhen.

Grundsätzlich kann die Einleitung von Horizontallasten am Längsrand von Dachfeldern nicht bedenkenlos allgemein empfohlen werden, da zu befürchten ist, dass der Dachaufbau infolge der Verformungen beschädigt wird und es z.B. direkt hinter der Attika zu Undichtigkeiten kommt. Speziell bei den Anwendungen, bei denen Dachschub aus der Außenschale eingeleitet werden soll, ist zu befürchten, dass infolge der Verformungen der Tragschale die Außenschale beschädigt wird (z.B. Aushebeln von Stehfalzprofilhaltern aus der Verbördelung).



## **10 Schrifttum**

- [1] DIN 18807-1:1987-06: Trapezprofile im Hochbau; Stahltrapezprofile; Allgemeine Anforderungen, Ermittlung der Tragfähigkeitswerte durch Berechnung
- [2] DIN 18807-2: 1987-06: Trapezprofile im Hochbau; Stahltrapezprofile; Durchführung und Auswertung von Tragfähigkeitsversuchen
- [3] DIN 18807-3: 1987-06: Trapezprofile im Hochbau; Stahltrapezprofile; Festigkeitsnachweis und konstruktive Ausbildung
- [4] Kanning, W.: Scheibenbeanspruchung von Trapezblechen bei Einleitung der Lasten in den Obergurt, rechtwinklig zur Spannrichtung. Mitteilungen IfBt 1982, S.79 – 81.

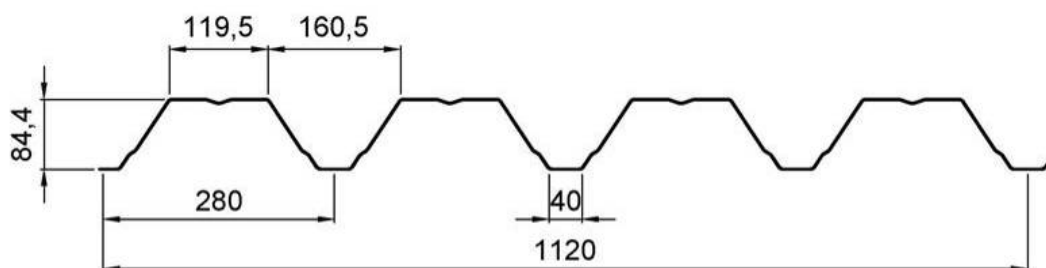
## Anhang A: Versuche

### A.0 Vorbemerkungen

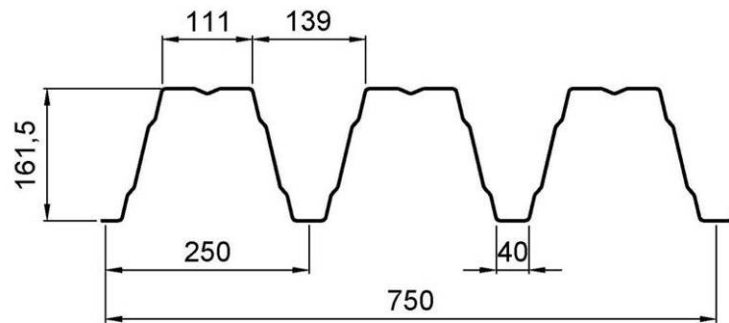
In den Versuchen wurden zwei unterschiedliche Profilquerschnitte (Abbildung A.1 und Abbildung A.2) mit unterschiedlichen Blechdicken untersucht. Stützweite und Lasteinleitung wurden variiert (Tabelle A.0).

Versuch	Profil	Blechdicke	Stützweite	Hebelarm	Belastung
		[mm]	[m]	[mm]	
1	85/280	0,75	6,0	0	WA
2			4,0		WA
3					WA
4		1,00	6,0		WA
5					WA
6					1,50
7	160/250	0,75	6,0	0	WA
8					WA
9	85/280	0,75	4,0	60	DS
10			6,0	200	DS
11				1,00	DS
12	160/250	0,75	6,0	60	DS
13					DS
14	85/280	0,75	6,0	200	WA
15					DS

**Tabelle A.0: Übersicht über die Bauteilversuche**

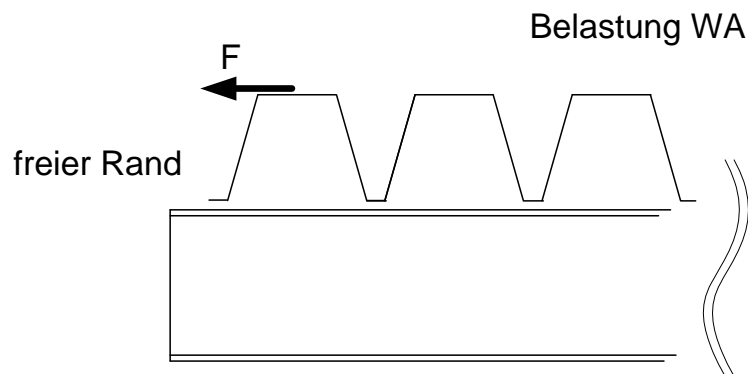


**Abbildung A.1: Querschnittsgeometrie FischerTRAPEZ 85/280**

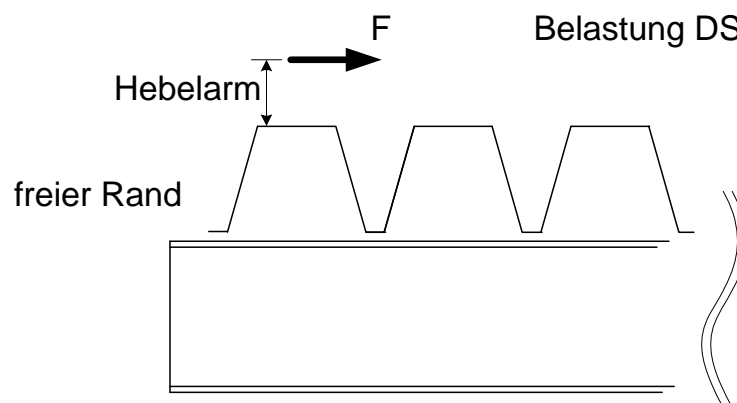


**Abbildung A.2: Querschnittsgeometrie FischerTRAPEZ 165/250**

Es wurden die Belastungen WA („Windsog Attika“, Abbildung A.3) und DS (Dachschub, Abbildung A.4) untersucht, letztere Belastung in Verbindung mit einem Hebelarm, der die bei der Einleitung des Dachschubs aus der Außenschale in die Tragschale anzutreffende Belastungssituation repräsentiert.



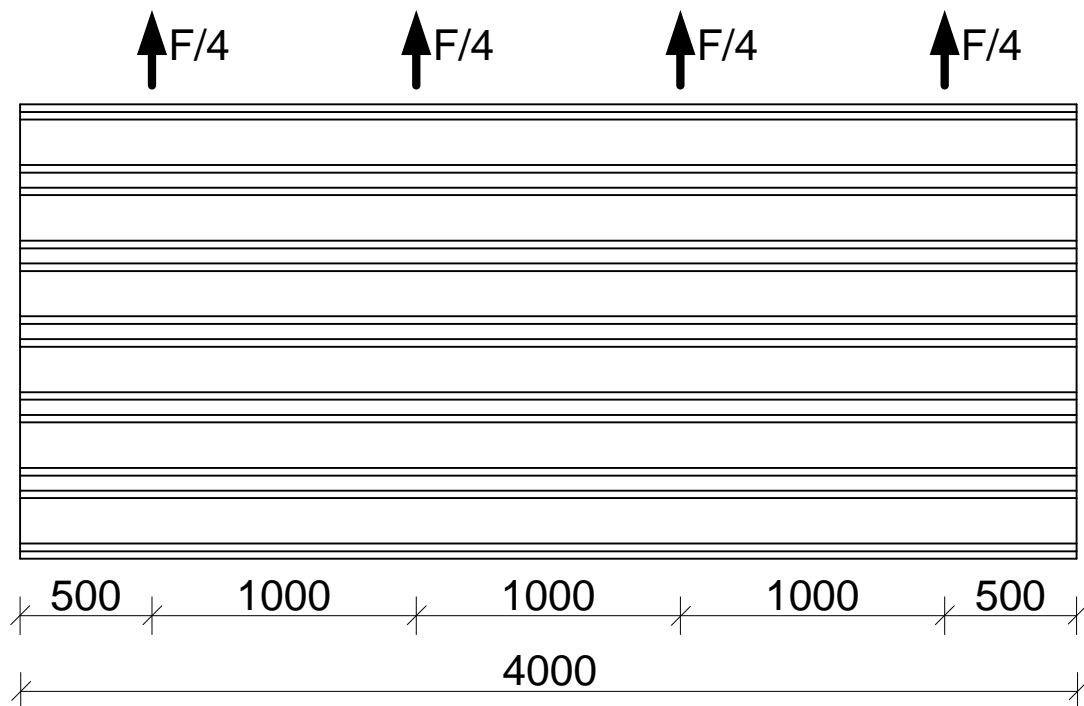
**Abbildung A.3: Belastung WA: Zugkraft am freien Rand, z.B. infolge Windsog an der Attika**



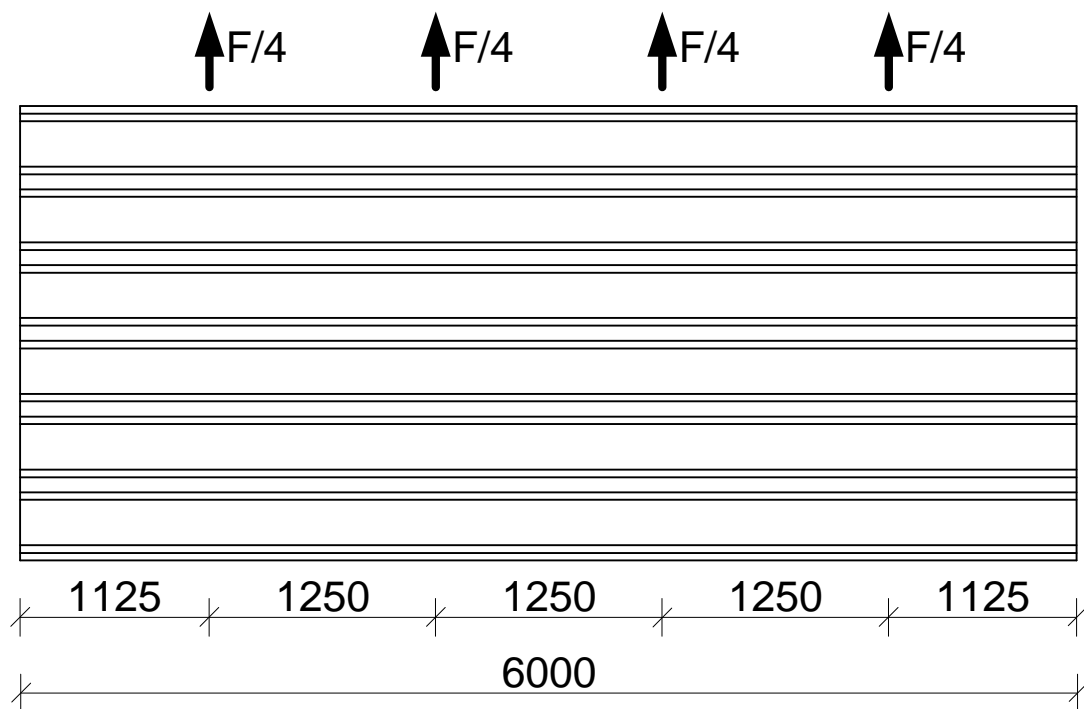
**Abbildung A.4: Belastung DS: Druckkraft am freien Rand, z.B. infolge Einleitung des Dachschubs aus der Außenschale am First**

Die Verbindung der Profiltafeln mit der Unterkonstruktion erfolgt durch gewindefurchende Schrauben TDB-S-S16-6,3x25. Die Ränder der Profiltafeln wurden am Längsstoß mit Bohrschrauben SL2-4,8x20 verbunden. Der Verbindungsmittelabstand betrug  $e = 666$  mm. Diese Schrauben wurden auch für die Befestigung der Verstärkungsbleche auf dem Profiltafeln ver-

wendet. Die Befestigung der Lasteinleitungsstruktur (Stahllaschen) auf den Obergurten erfolgte blechdickenabhängig mit Bohrschrauben SDK2-S-6,0X35 oder SDK3-S-6,0x30. Die folgenden Abbildungen zeigen die Verteilung der Lasteinleitungsstellen über die Tafellänge (dargestellt für die Belastung WA). Die Belastung wurde über an Traversen hängenden Kettenzüge und auf den Gurten befestigten Stahllaschen eingeleitet. Die Belastungsgeschwindigkeit wurde stützweitenabhängig festgelegt: In den Versuchen mit einer Stützweite von 4,0 m betrug diese 8 mm/min, in den Versuchen mit einer Stützweite von 6,0 m betrug diese 12 mm/min.



**Abbildung A.5: Verteilung der Lasteinleitungsstellen bei einer Stützweite von 4000 mm**



**Abbildung A.6: Verteilung der Lasteinleitungsstellen bei einer Stützweite von 6000 mm**

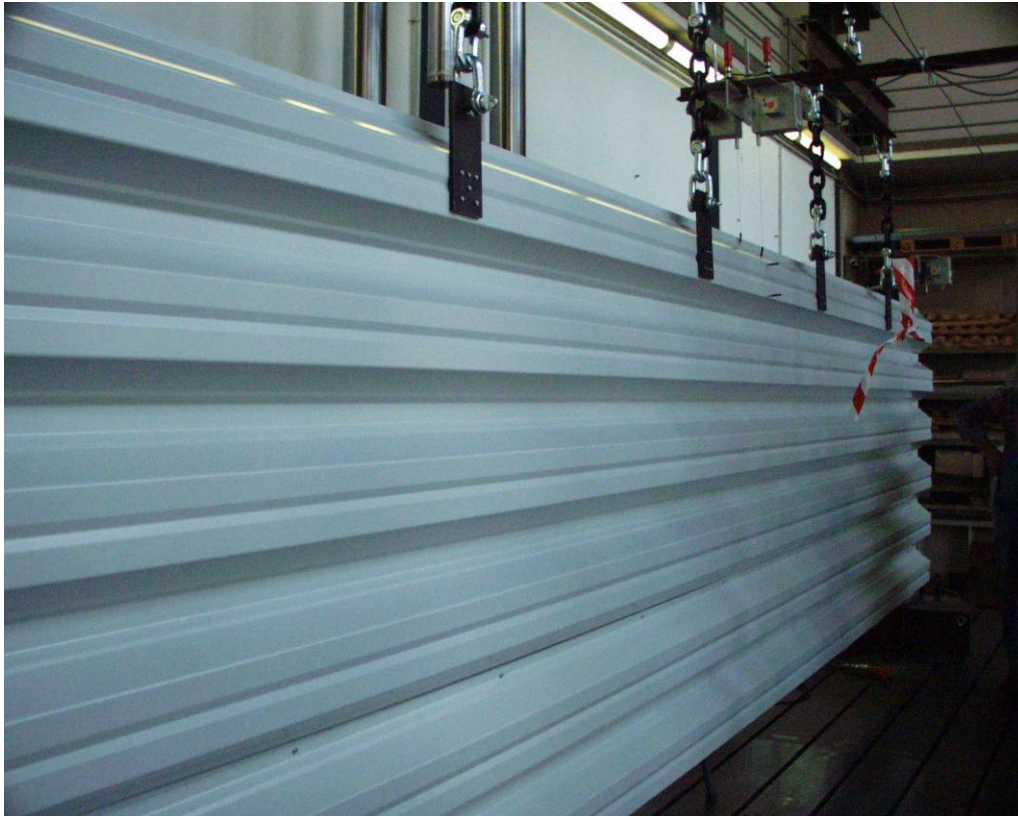
Im Folgenden sind Abbildungen der Versuchskörper aufgeführt, ergänzt um Angaben zum Versagensmodus. Für jeden Versuch sind die Diagramme mit den gemessenen Verformungen zusammengestellt. Die aufgeführten Kraft-Maschinenweg-Diagramme zeigen den gesamten Versuchsverlauf einschließlich Lastabfall infolge örtlichen Versagens. Die Kraft-Verschiebungs-Diagramme und Kraft-Gurtverdrehungs-Diagramme wurden bei der Maximalkraft oder bei sich schlagartig einstellenden großen Verschiebungen abgeschnitten.

### A.1 Versuch 1

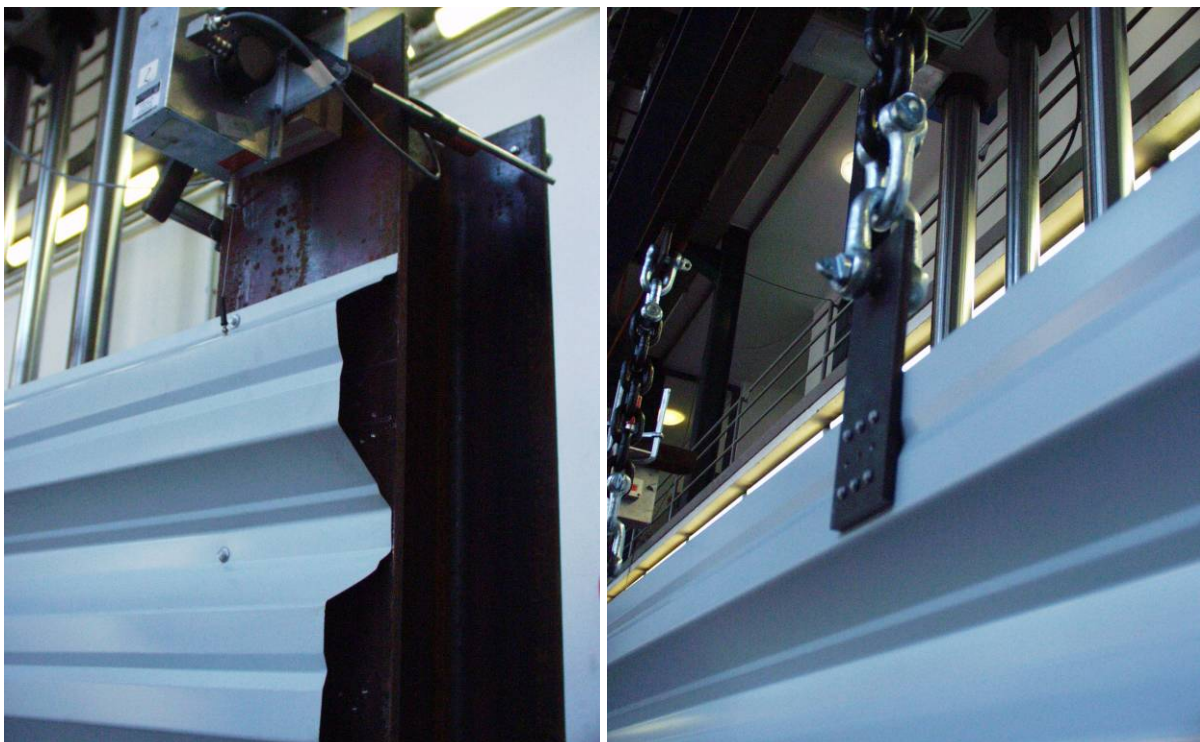
Versuch	Profil	Blechdicke	Stützweite	Hebelarm	Belastung
		[mm]	[m]	[mm]	
1	85/280	0,75	6,0	0	WA

**Tabelle A.1: Versuchsparameter**

Das Versagen trat im Bereich der Verbindungen des schmalen Gurtes mit der Unterkonstruktion durch Langlochbildung ein. Nach dem Versagen der ersten Verbindung kam es zu einem starken Lastabfall. Anschließend konnte die Belastung wieder bis zum Versagen der zweiten Verbindung (gleiche Rippe, anderes Auflager) gesteigert werden.

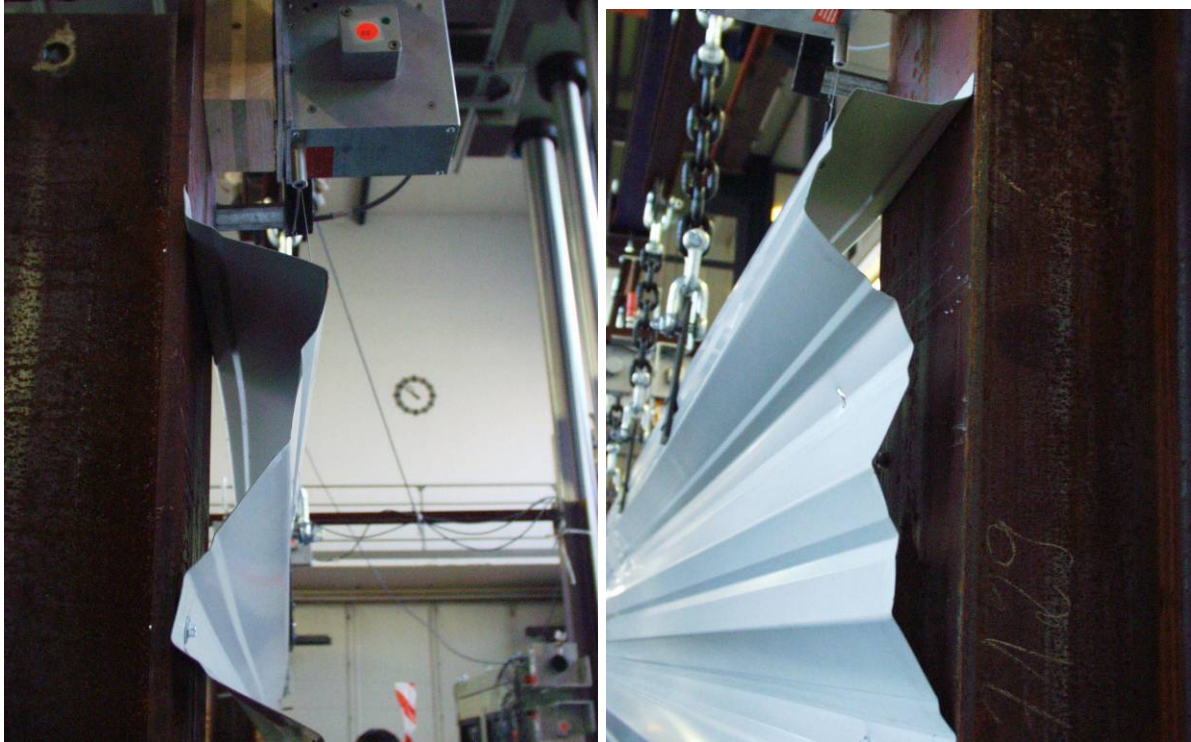


**Abbildung A.7: Versuchsaufbau**



**Abbildung A.8: Auflager und Lasteinleitung**



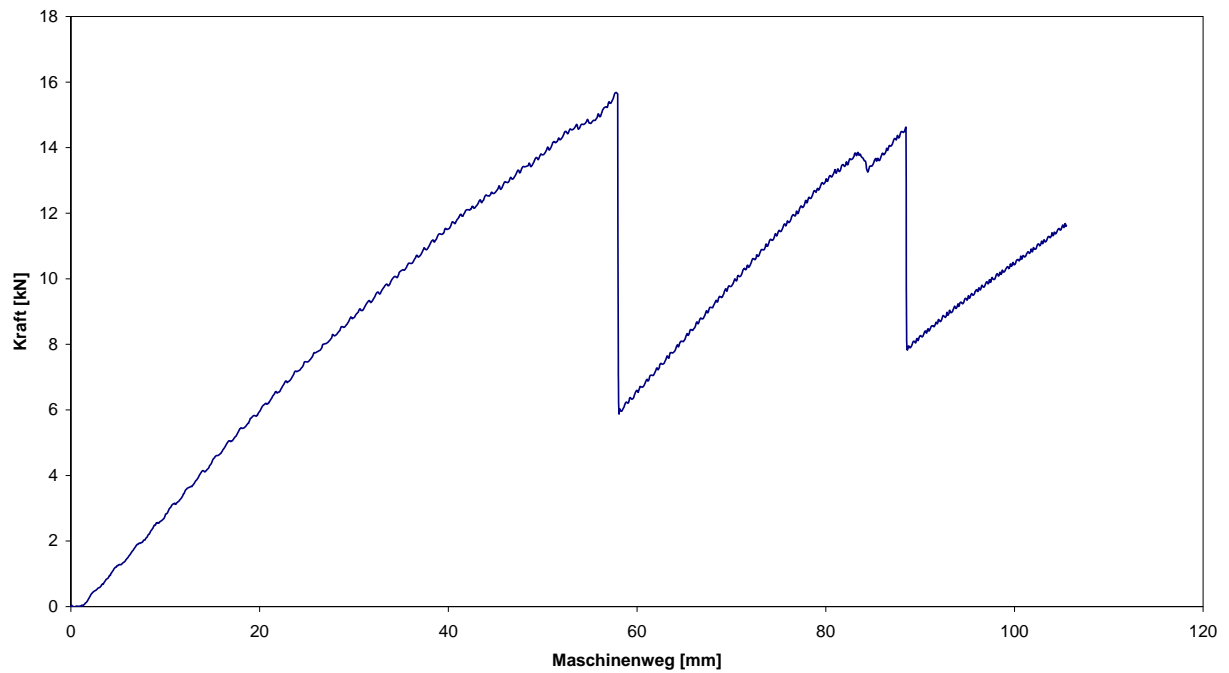


**Abbildung A.9: Querschnittsverformung am Auflager vor und nach dem Versagen der Verbindung**



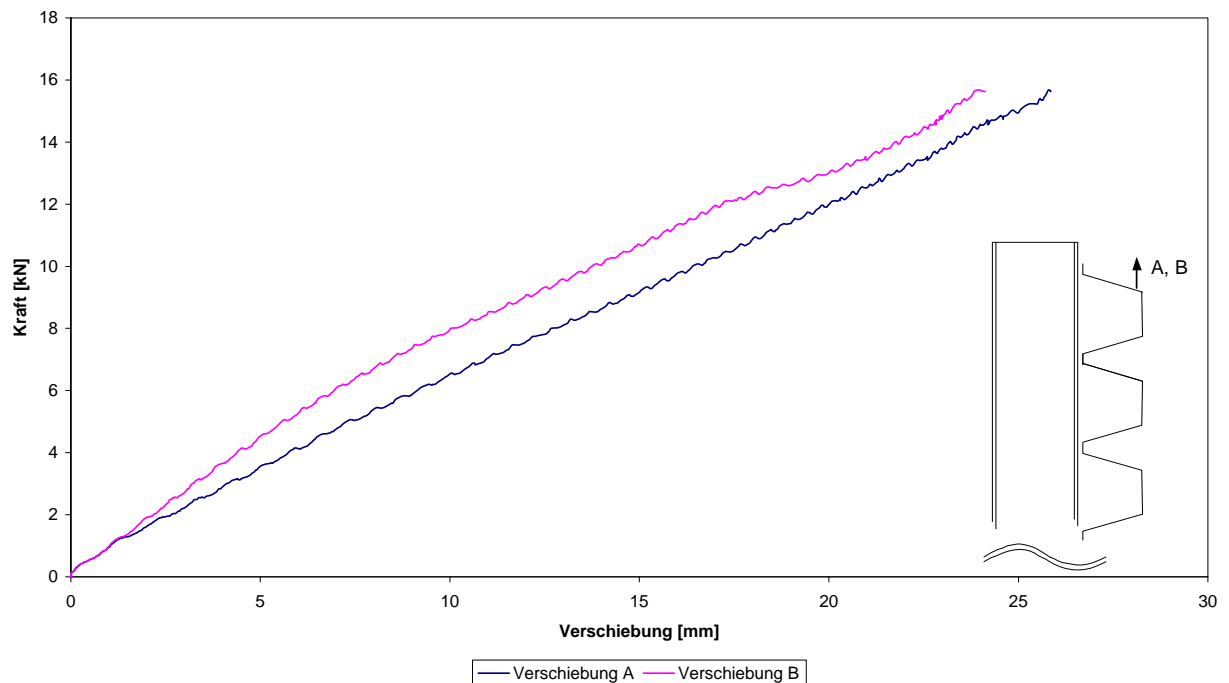
**Abbildung A.10: Versagen der Verbindung mit der Unterkonstruktion**

**Versuch 1**



**Abbildung A.11: Kraft-Maschinenweg-Diagramm Versuch 1**

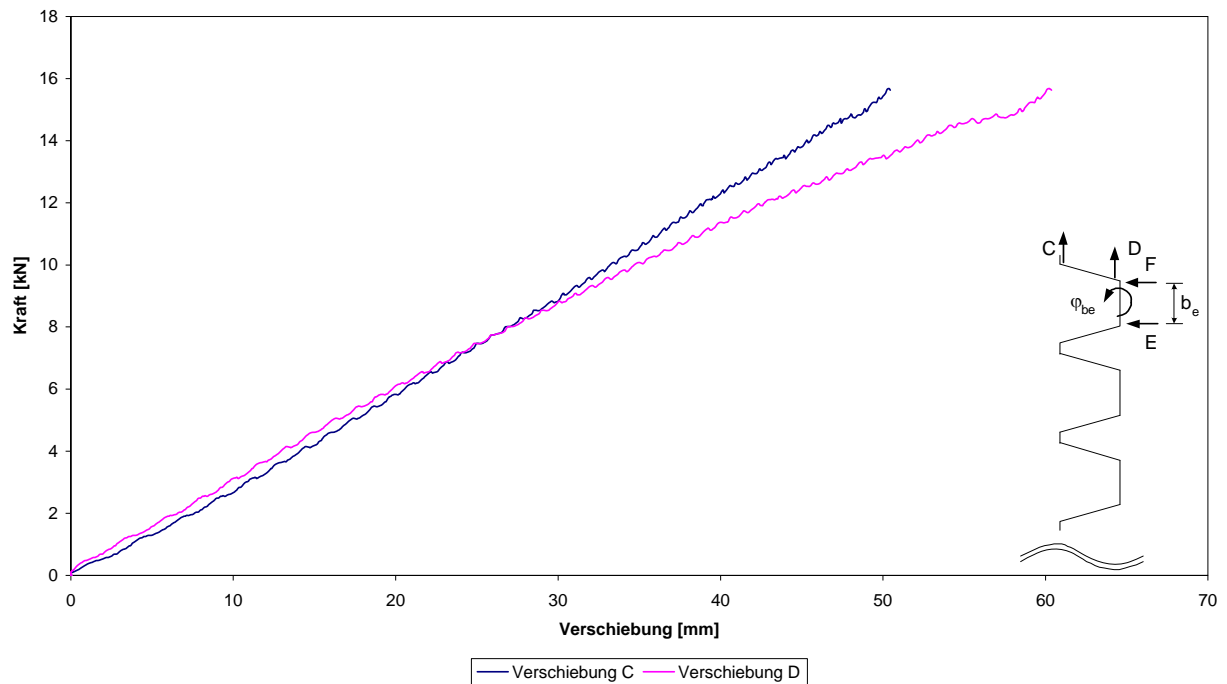
**Versuch 1**



**Abbildung A.12: Kraft-Verschiebungs-Diagramm**

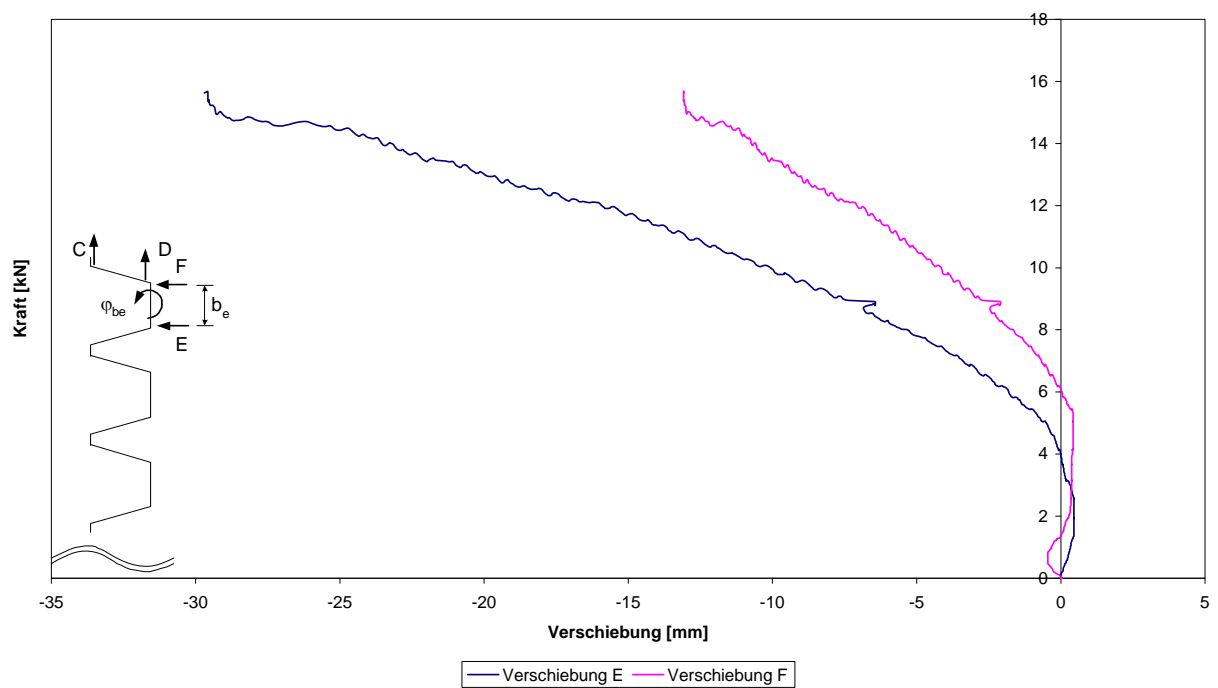


**Versuch 1**



**Abbildung A.13: Kraft-Verschiebungs-Diagramm**

**Versuch 1**



**Abbildung A.14: Kraft-Verschiebungs-Diagramm**

Versuch 1

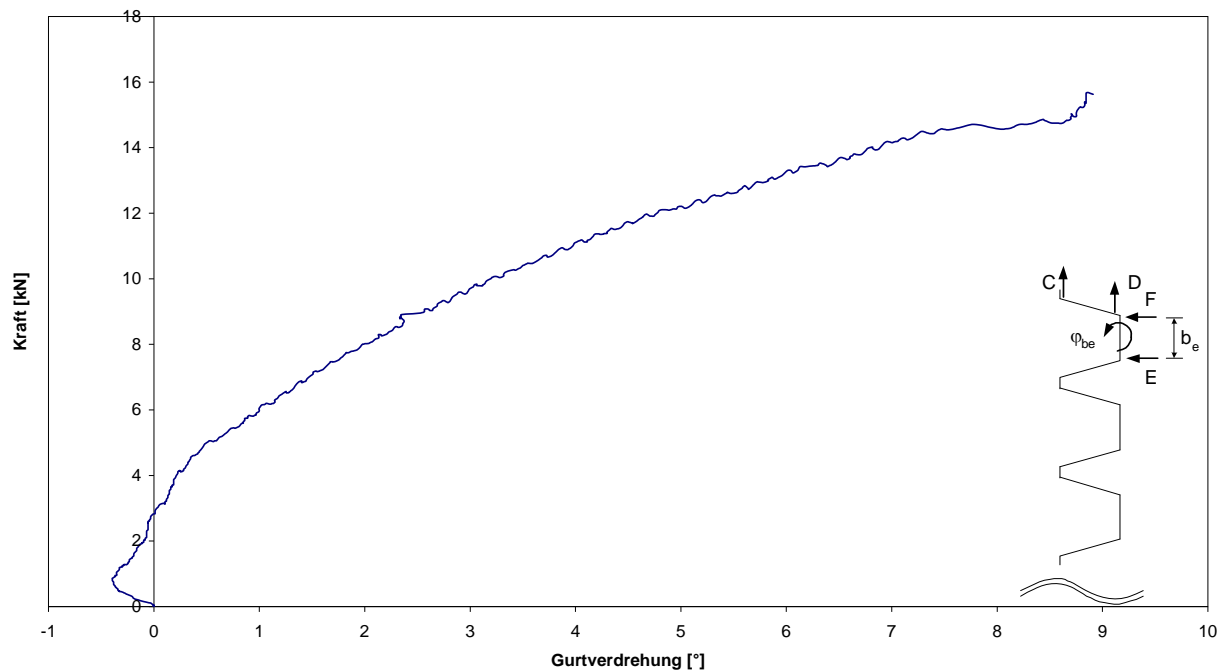


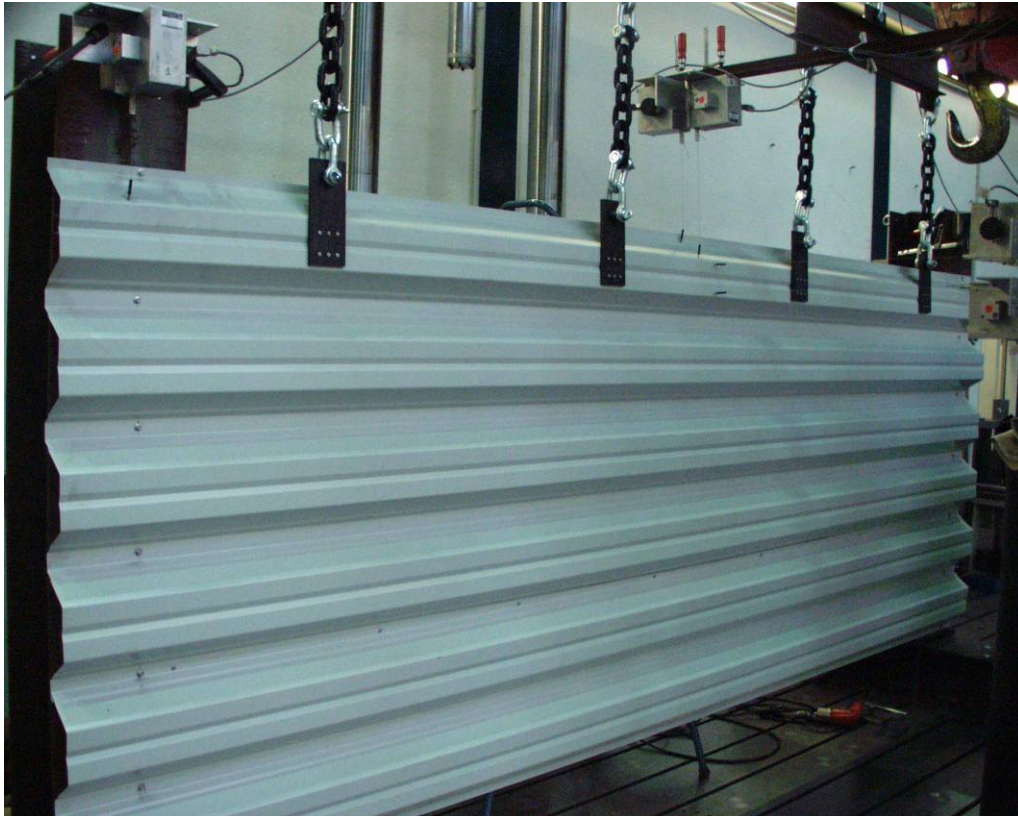
Abbildung A.15: Kraft-Gurtverdrehungs-Diagramm

A.2 Versuch 2

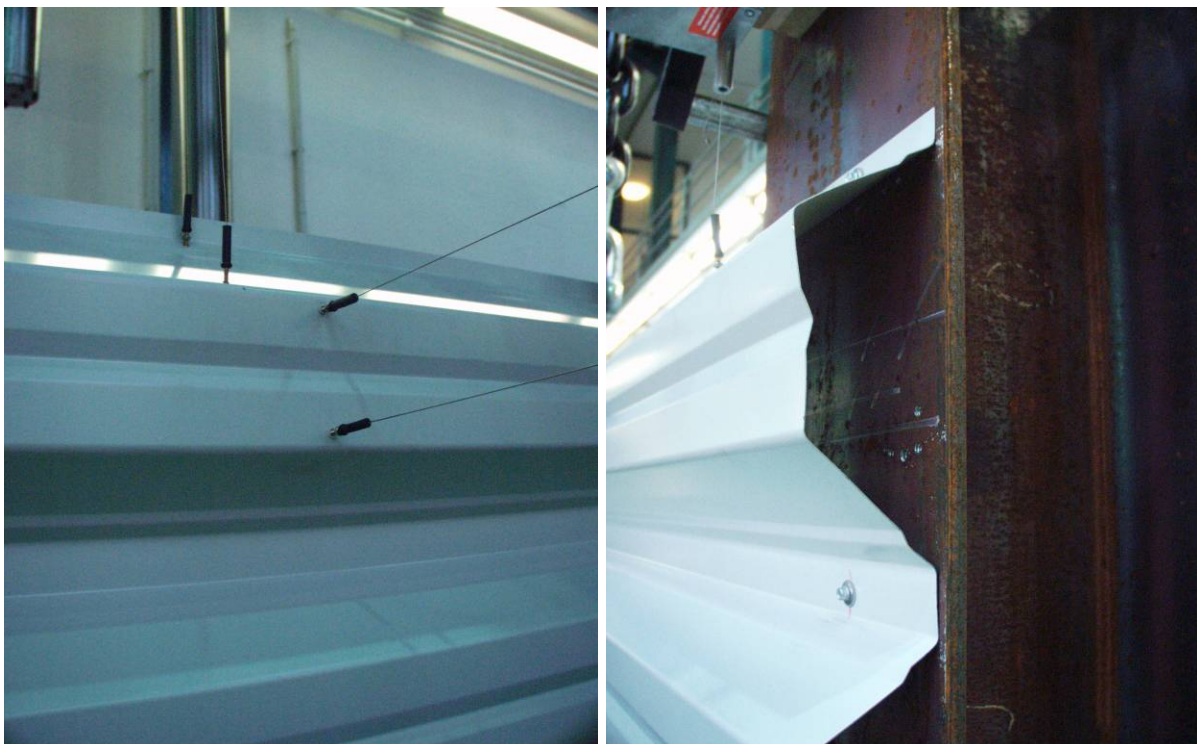
Versuch	Profil	Blechdicke	Stützweite	Hebelarm	Belastung
		[mm]	[m]	[mm]	
2	85/280	0,75	4,0	0	WA

Tabelle A.2: Versuchsparameter

Das Versagen trat im Bereich der Verbindungen des schmalen Gurtes mit der Unterkonstruktion durch Langlochbildung ein. Nach dem Versagen der ersten Verbindung kam es zu einem starken Lastabfall. Anschließend konnte die Belastung wieder bis zum Versagen der zweiten Verbindung (gleiche Rippe, anderes Auflager) gesteigert werden.

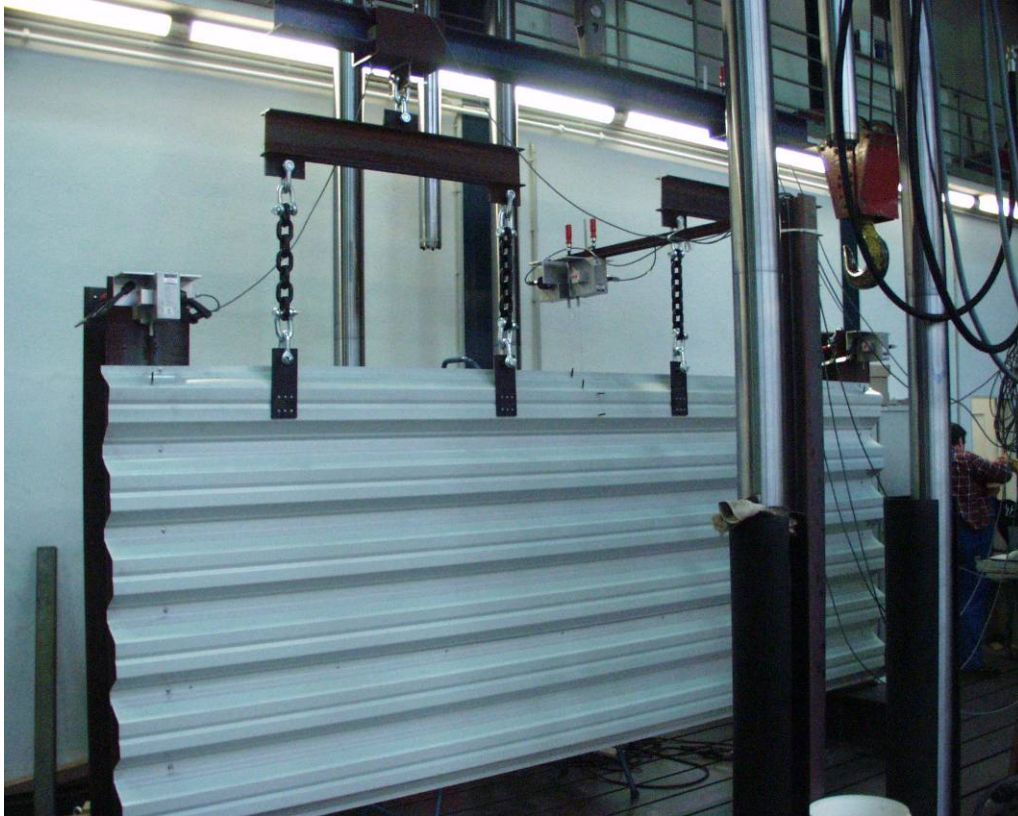


**Abbildung A.16: Versuchsaufbau**

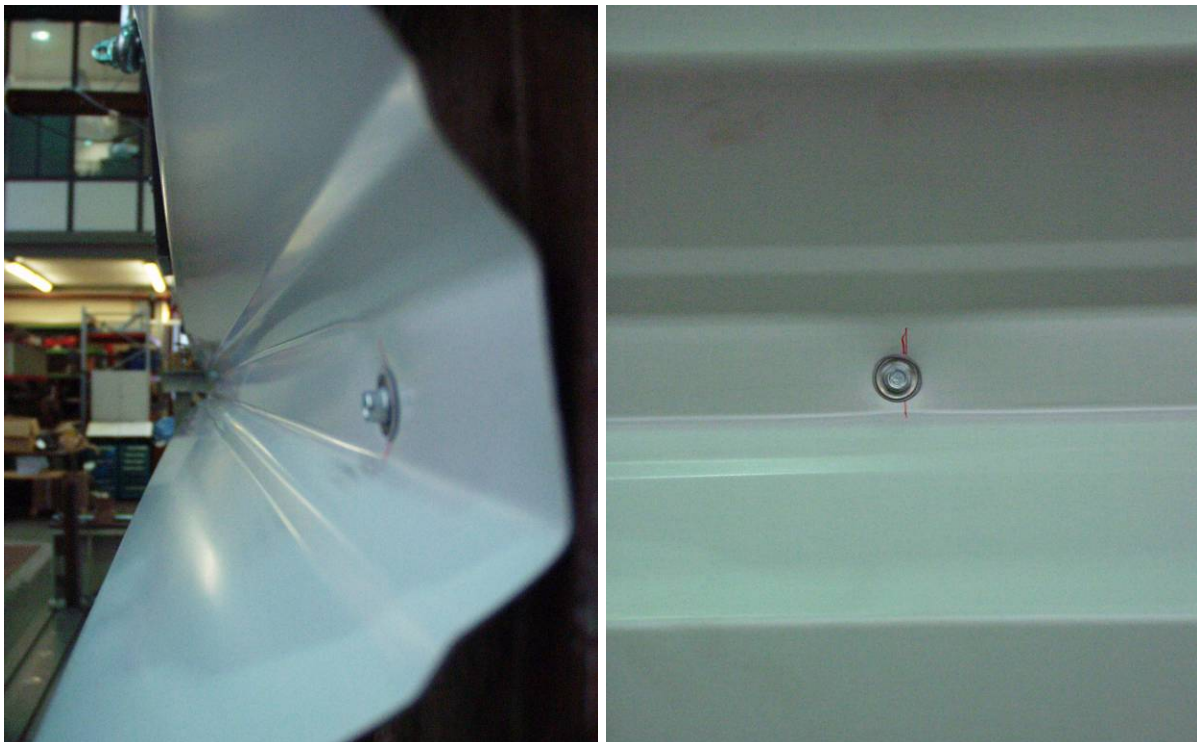


**Abbildung A.17: Messung der Verformung des belasteten Gurtes**





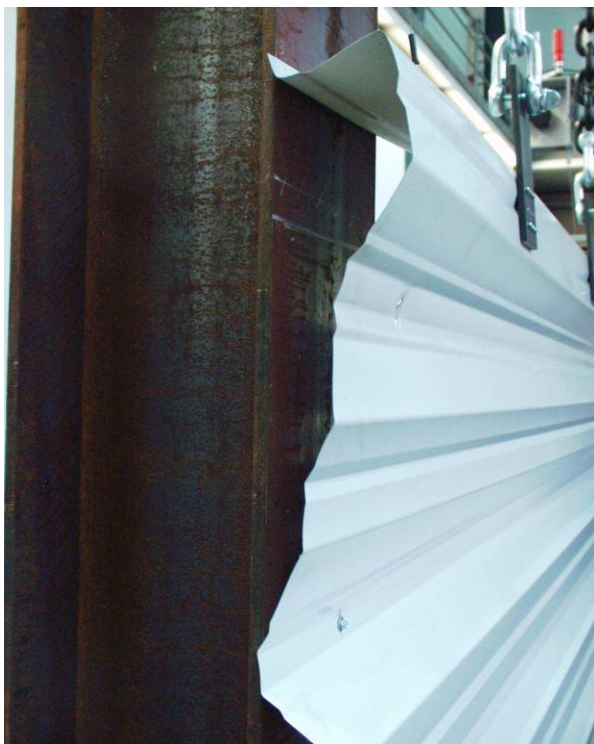
**Abbildung A.18: Traversen und Ketten zur Lasteinleitung**



**Abbildung A.19: Verformungen infolge Quer- und Zugkräften am Verbindungselement**



**Abbildung A.20: Örtliche Profilverformung**



**Abbildung A.21: Profilverformung nach dem Versagen der Verbindung**

Versuch 2

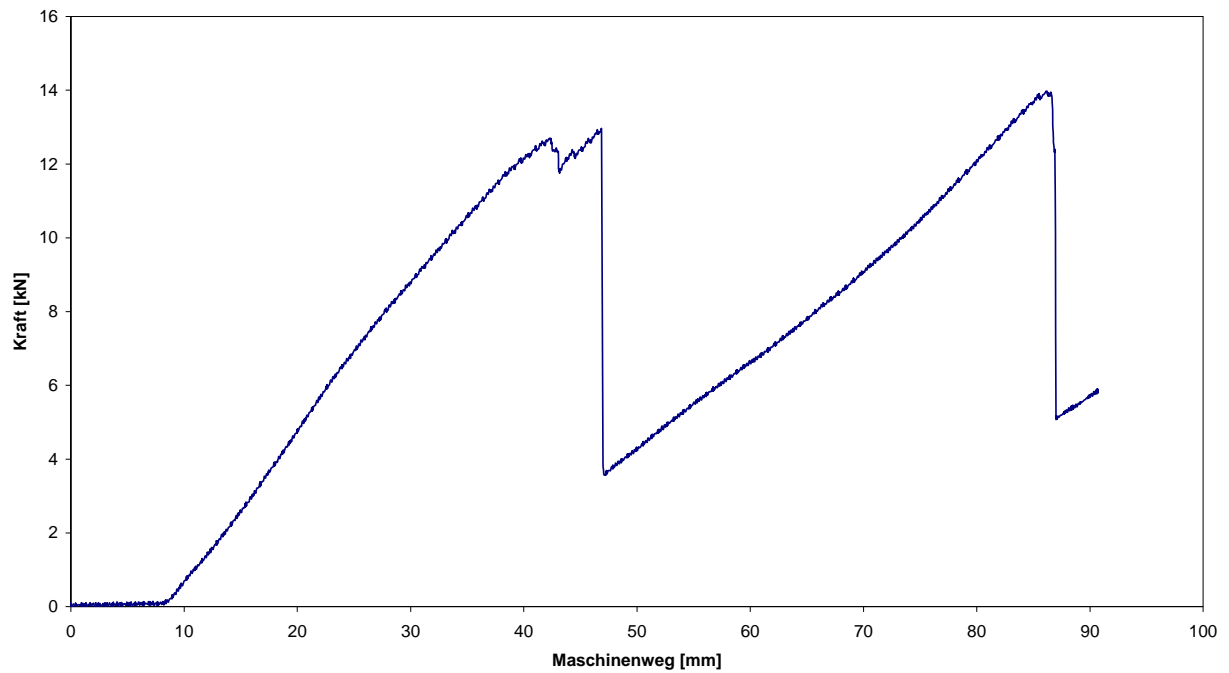


Abbildung A.22: Kraft-Maschinenweg-Diagramm Versuch 2

Versuch 2

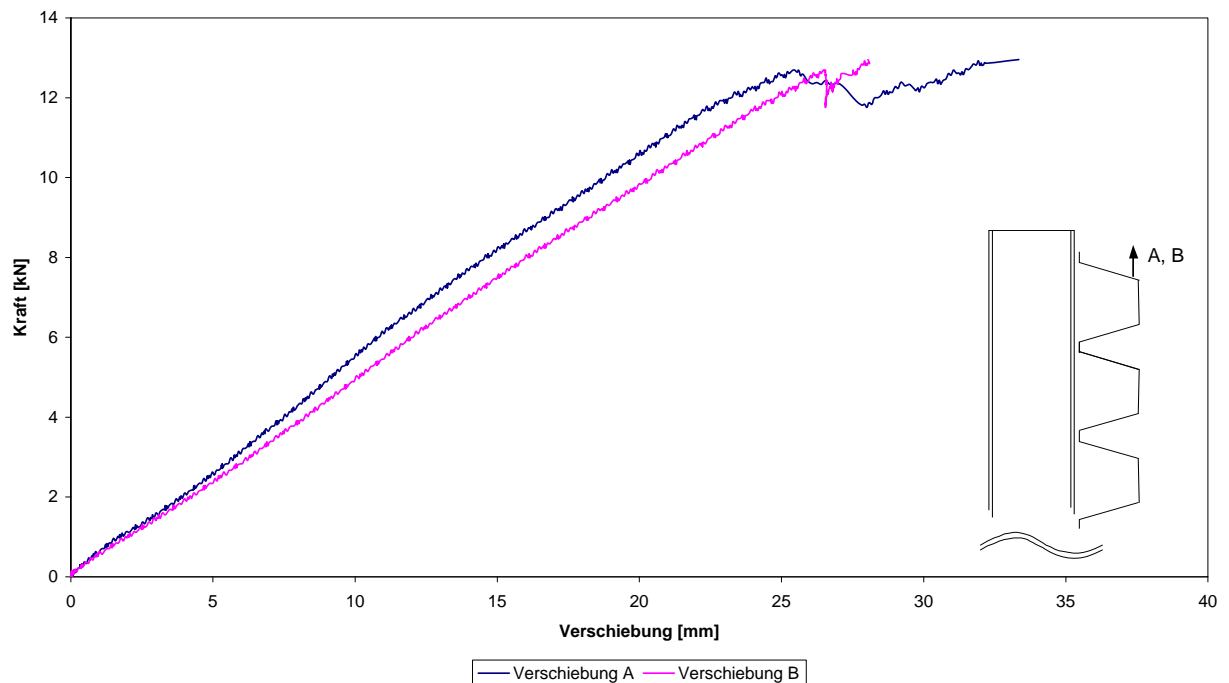


Abbildung A.23: Kraft-Verschiebungs-Diagramm

Versuch 2

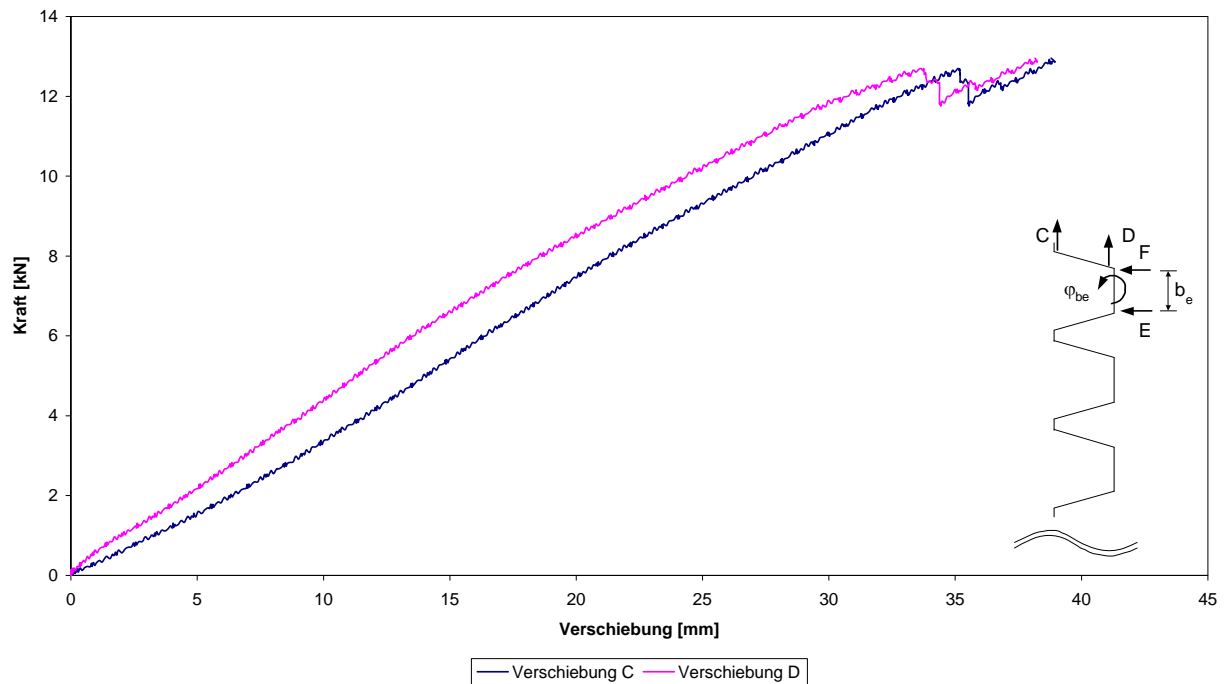


Abbildung A.24: Kraft-Verschiebungs-Diagramm

Versuch 2

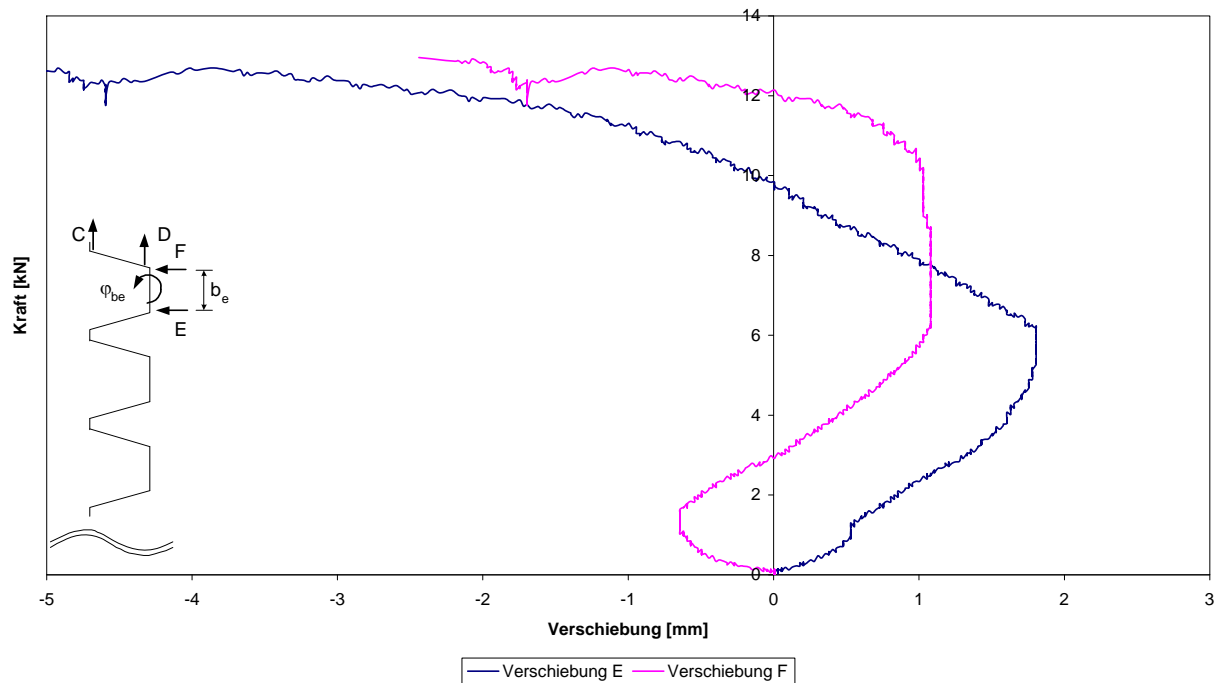


Abbildung A.25: Kraft-Verschiebungs-Diagramm



Versuch 2

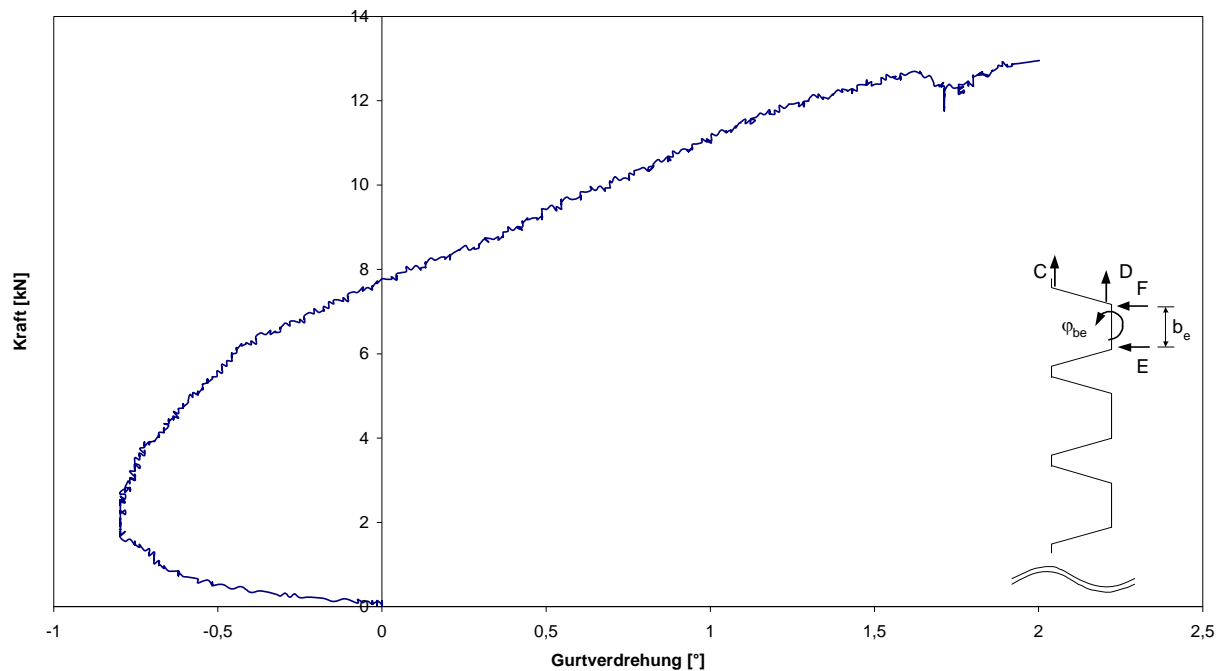


Abbildung A.26: Kraft-Gurtverdrehungs-Diagramm

A.3 Versuch 3

Versuch	Profil	Blechdicke	Stützweite	Hebelarm	Belastung
		[mm]	[m]	[mm]	
3	85/280	0,75	4,0	0	WA

Tabelle A.3: Versuchsparameter

Im Versuch 3 wurde der belastete Obergurt über eine Flachblechtafel (Nennblechdicke 0,75 mm) mit dem benachbarten Obergurt gekoppelt (Abbildung A.27).

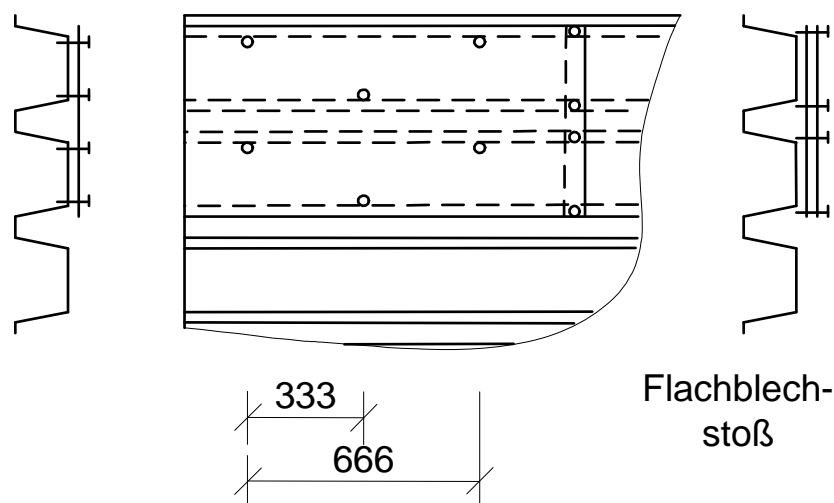


Abbildung A.27: Befestigung des Flachblechs und Stoßbereich



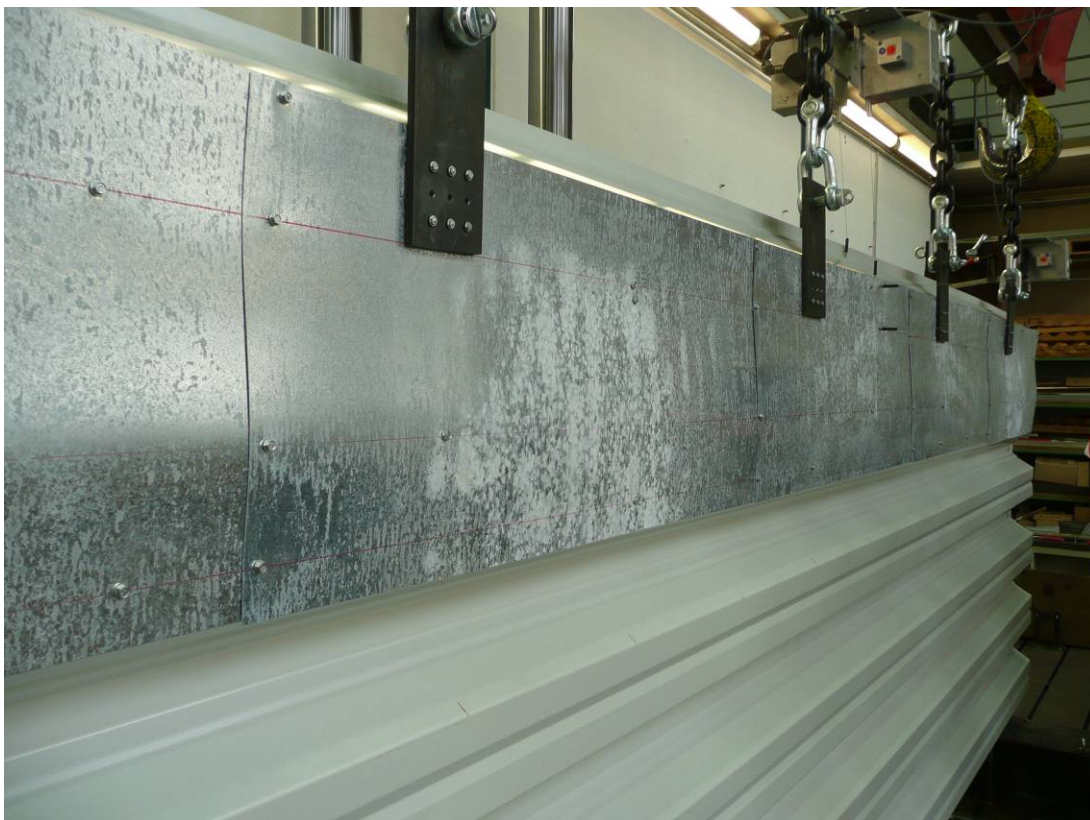
Das Versagen trat im Bereich der Verbindungen des schmalen Gurtes mit der Unterkonstruktion durch Langlochbildung ein. Nach dem Versagen der ersten Verbindung kam es zu einem starken Lastabfall. Anschließend konnte die Belastung wieder bis zum Versagen der zweiten Verbindung (gleiche Rippe, anderes Auflager) gesteigert werden.



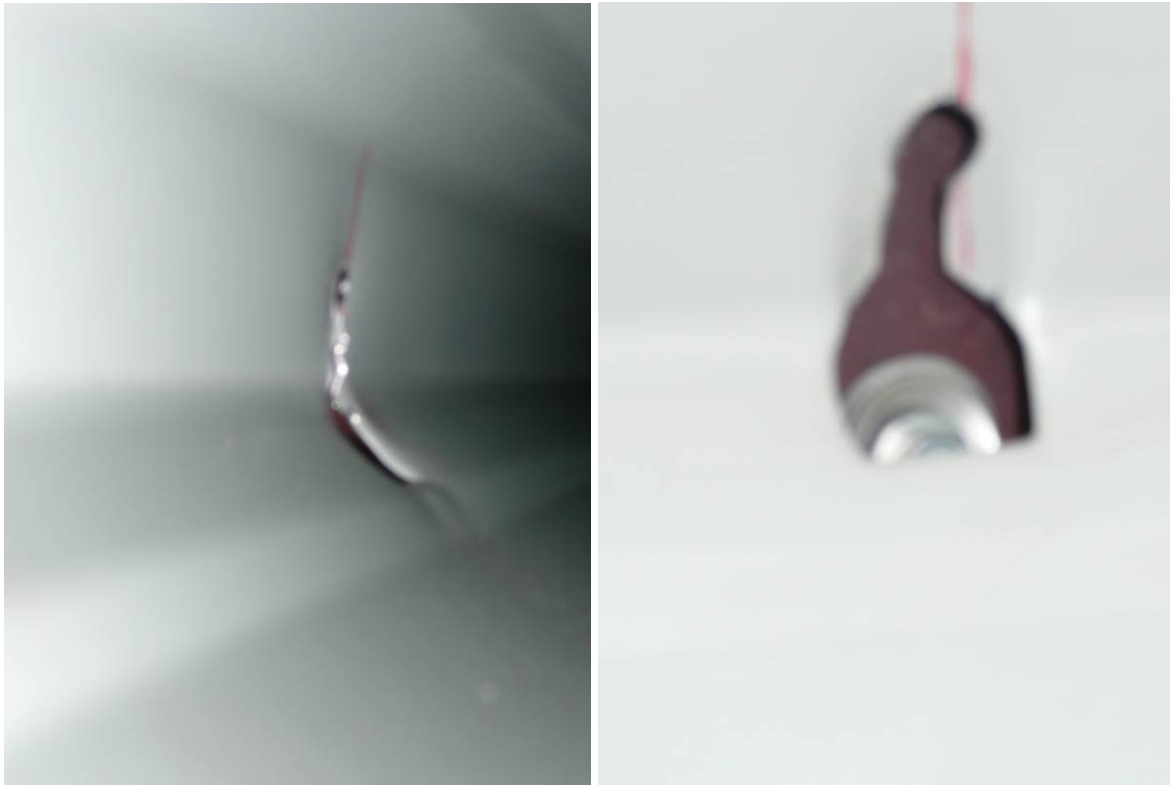
**Abbildung A.28: Versuchsaufbau**



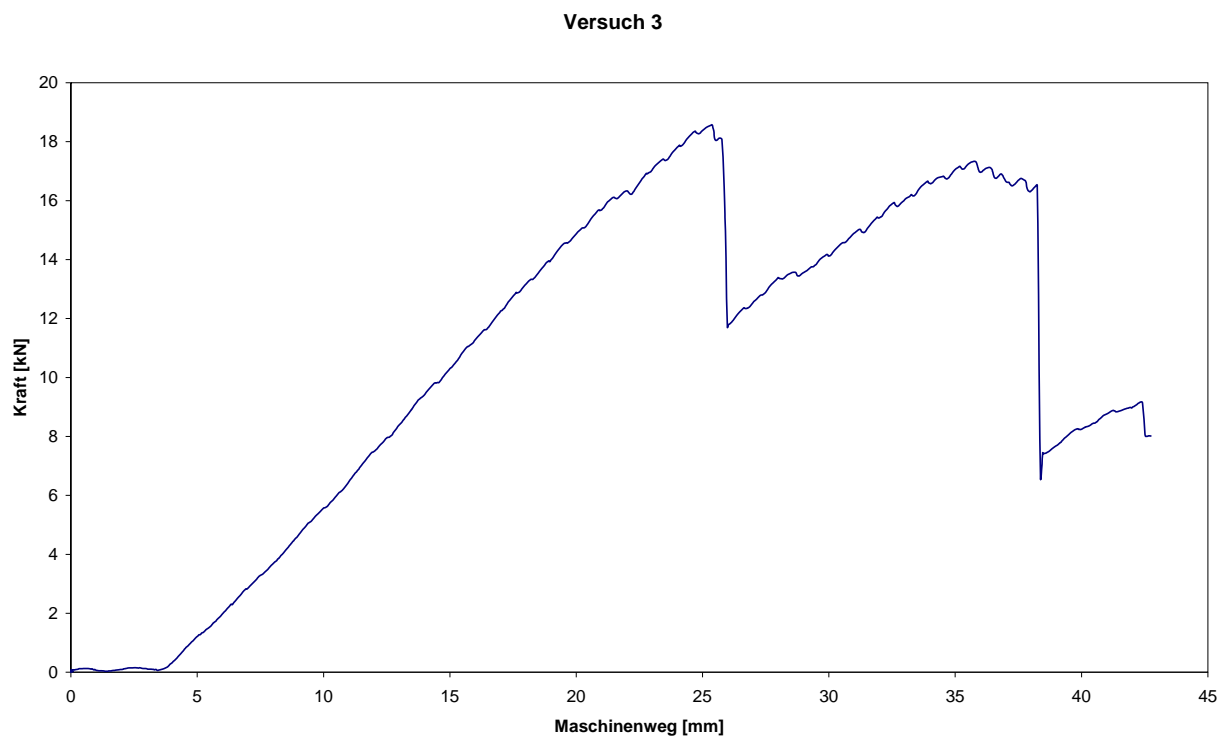
**Abbildung A.29: Flachblech am unbelasteten und belasteten Versuchsaufbau**



**Abbildung A.30: Verformungen des Flachblechs**

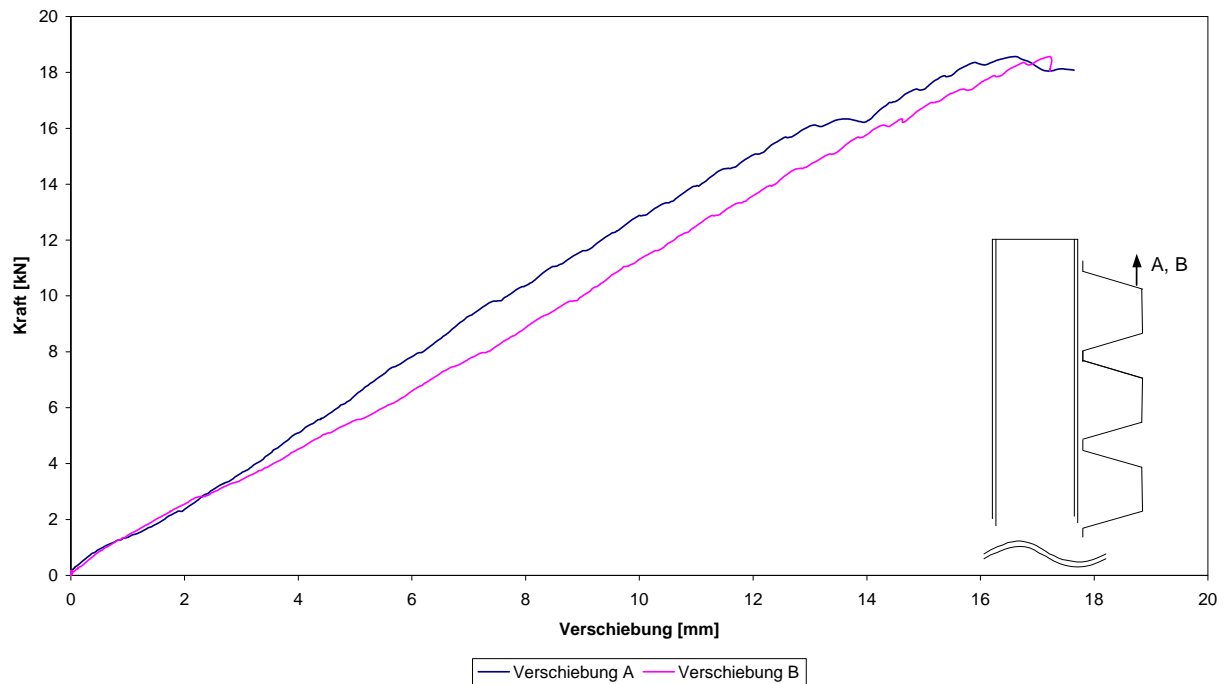


**Abbildung A.31: Versagen der Verbindungen**



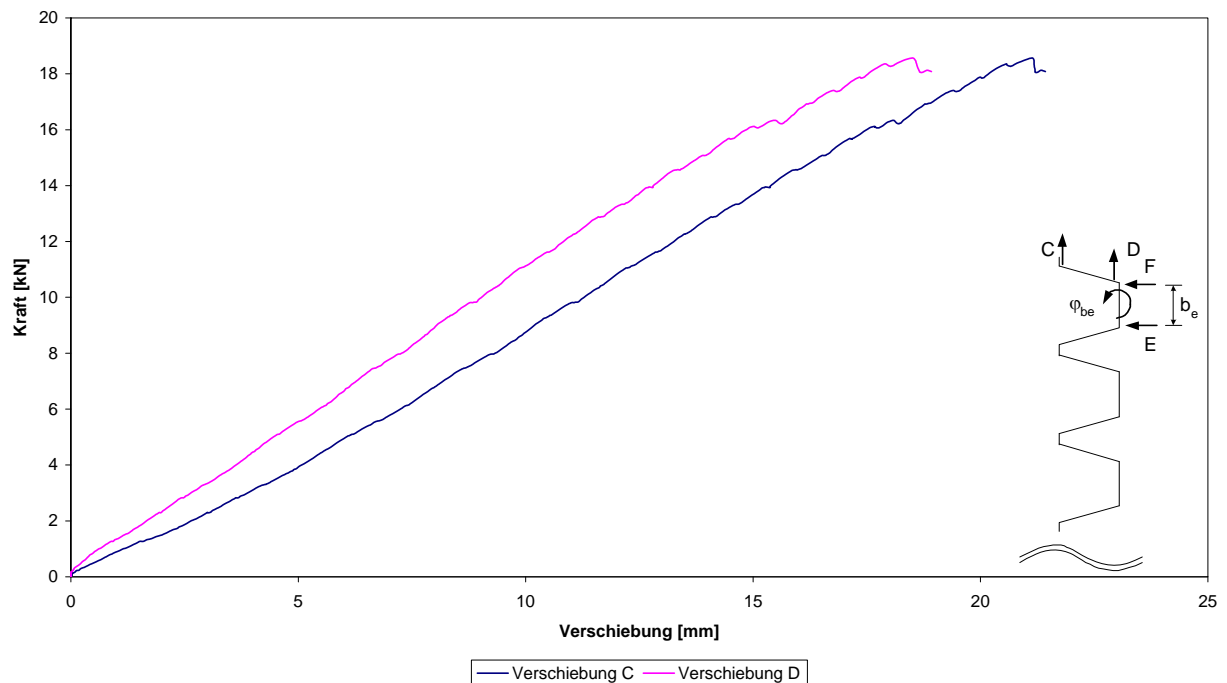
**Abbildung A.32: Kraft-Maschinenweg-Diagramm Versuch 3**

**Versuch 3**



**Abbildung A.33: Kraft-Verschiebungs-Diagramm**

**Versuch 3**



**Abbildung A.34: Kraft-Verschiebungs-Diagramm**

Versuch 3

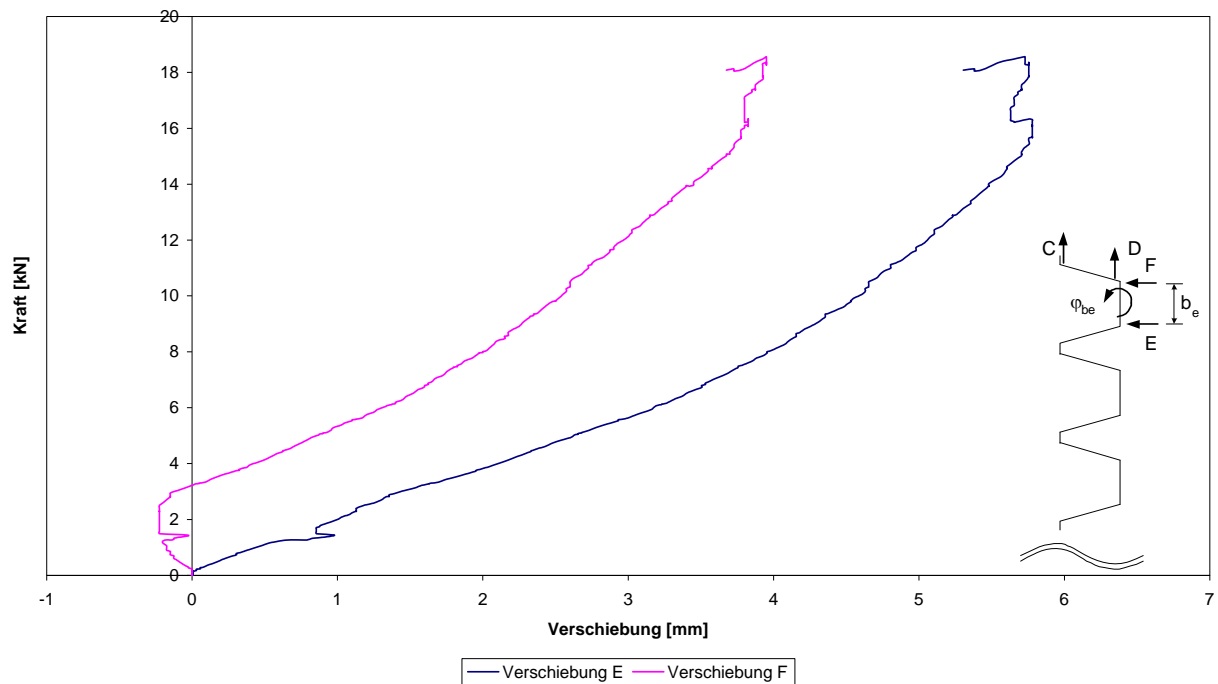


Abbildung A.35: Kraft-Verschiebungs-Diagramm

Versuch 3

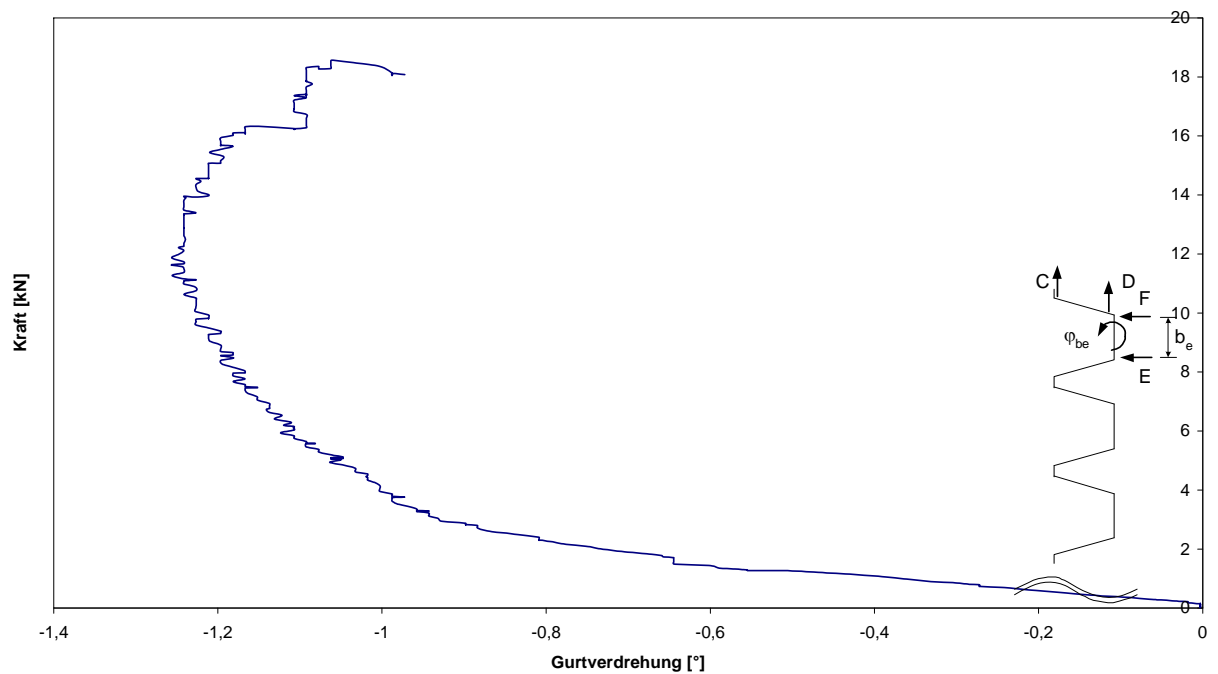


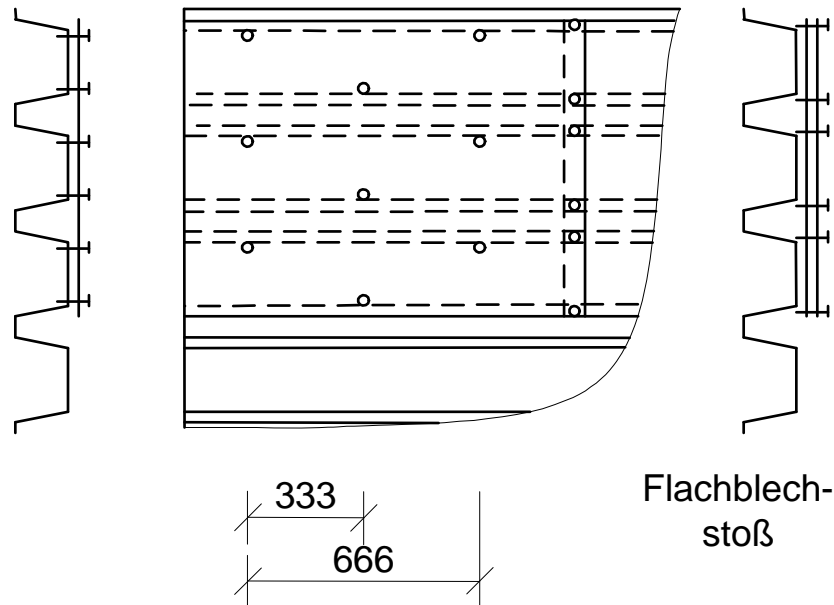
Abbildung A.36: Kraft-Gurtverdrehungs-Diagramm

**A.4 Versuch 4**

Versuch	Profil	Blechdicke	Stützweite	Hebelarm	Belastung
		[mm]	[m]	[mm]	
4	85/280	0,75	4,0	0	WA

**Tabelle A.4: Versuchsparameter**

Im Versuch 4 wurde der belastete Obergurt über eine Flachblechtafel (Nennblechdicke 0,75 mm) mit den beiden benachbarten Obergurten gekoppelt (Abbildung A.37).



**Abbildung A.37: Befestigung des Flachblechs und Stoßbereich**

Das Versagen trat im Bereich der Verbindungen des schmalen Gurtes mit der Unterkonstruktion durch Langlochbildung ein.





**Abbildung A.38: Versuchsaufbau**



**Abbildung A.39: Verformung des Flachblechs**



**Abbildung A.40: Verformung des Querschnitts einschließlich Flachblech**



**Abbildung A.41: Verformung des freien Längsrandes mit Teileinspannung durch die Dichtscheibe**



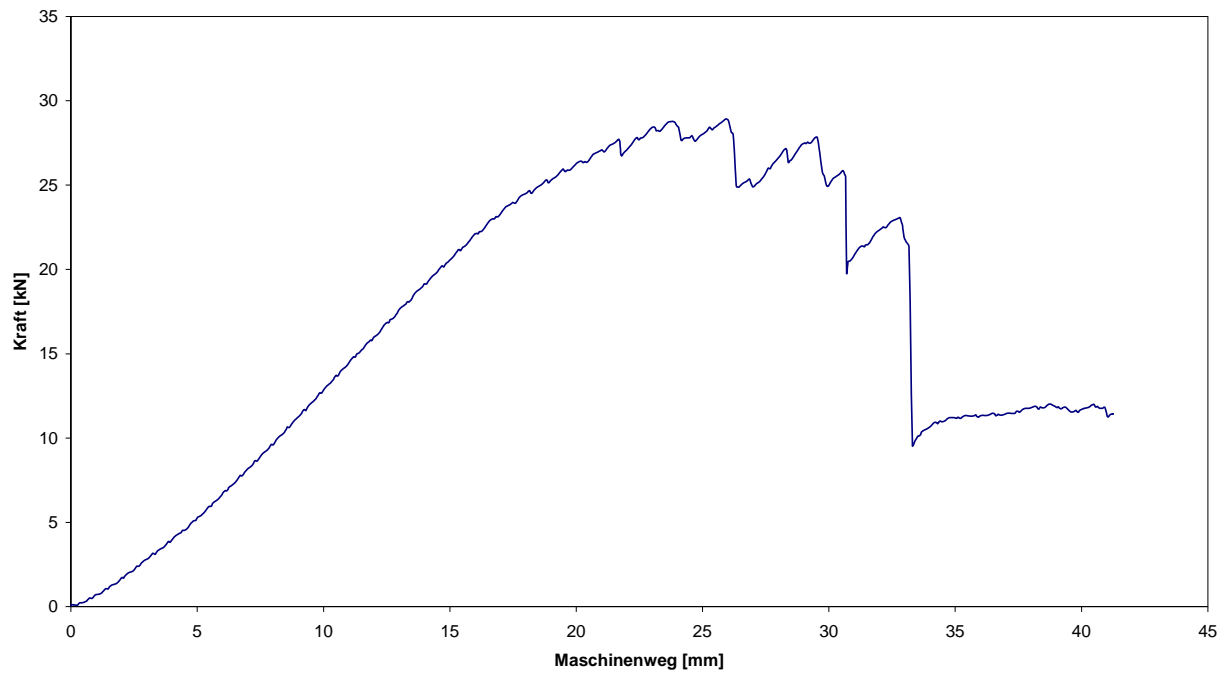


**Abbildung A.42: Versagen der Verbindung**



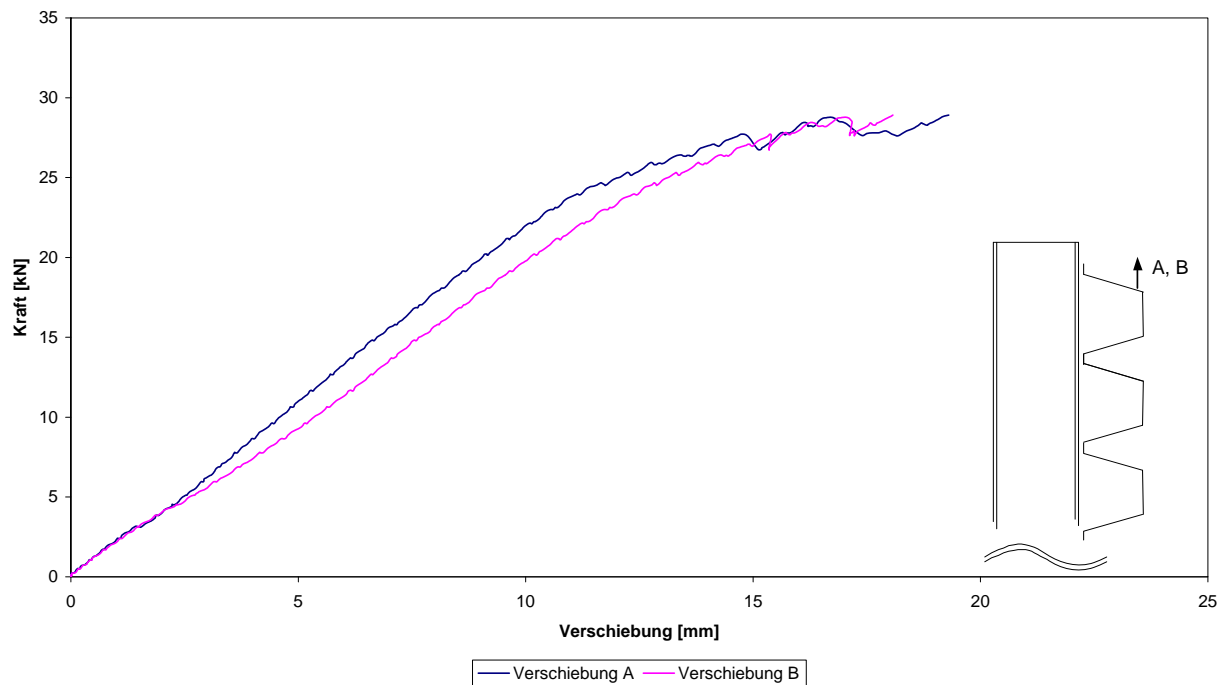
**Abbildung A.43: Verformung des anliegenden Gurtes und des angrenzenden Stegs**

**Versuch 4**



**Abbildung A.44: Kraft-Maschinenweg-Diagramm Versuch 4**

**Versuch 4**



**Abbildung A.45: Kraft-Verschiebungs-Diagramm**

Versuch 4

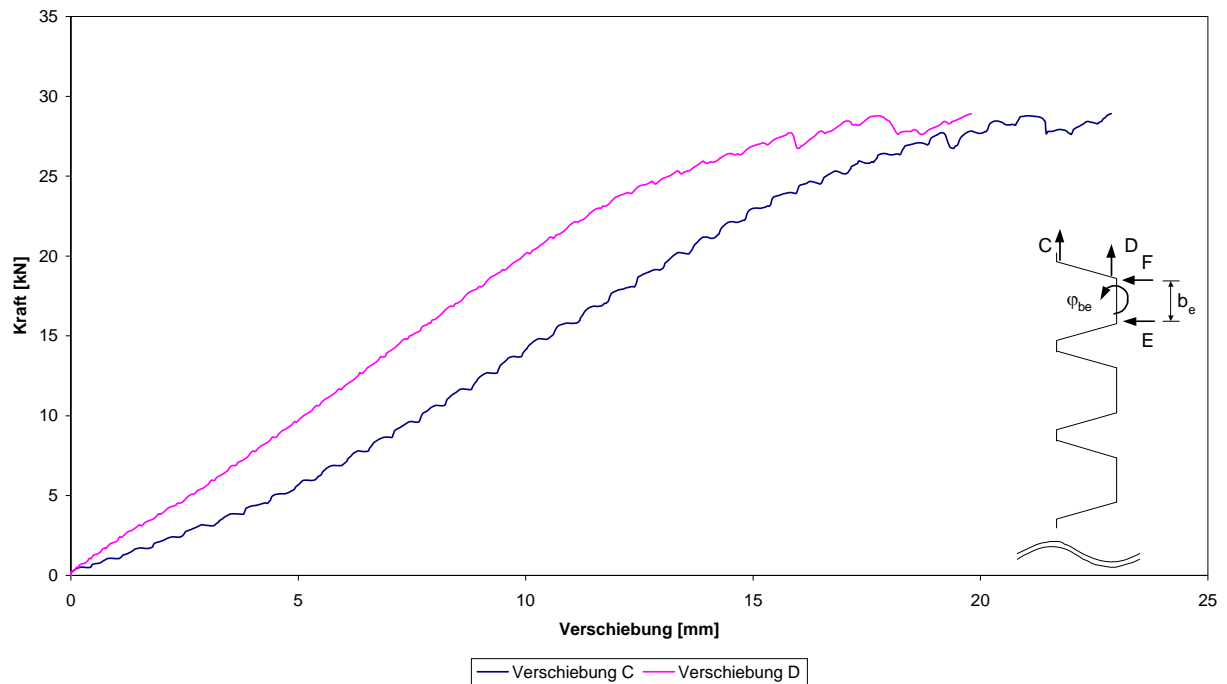


Abbildung A.46: Kraft-Verschiebungs-Diagramm

Versuch 4

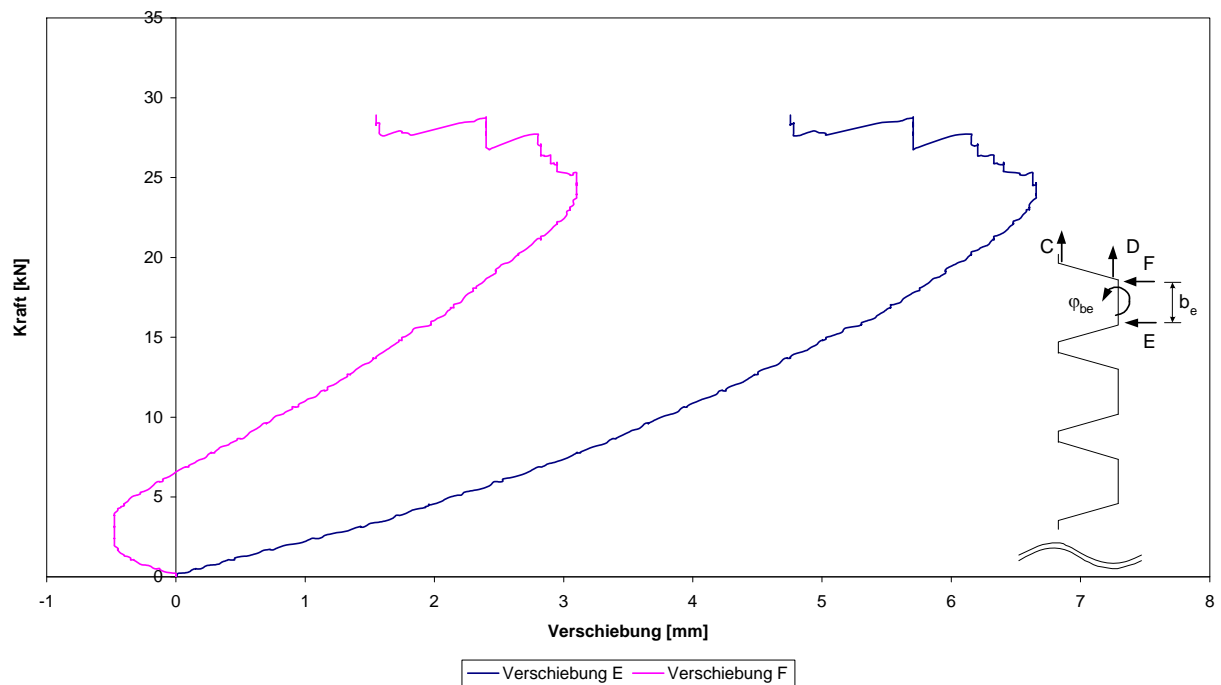
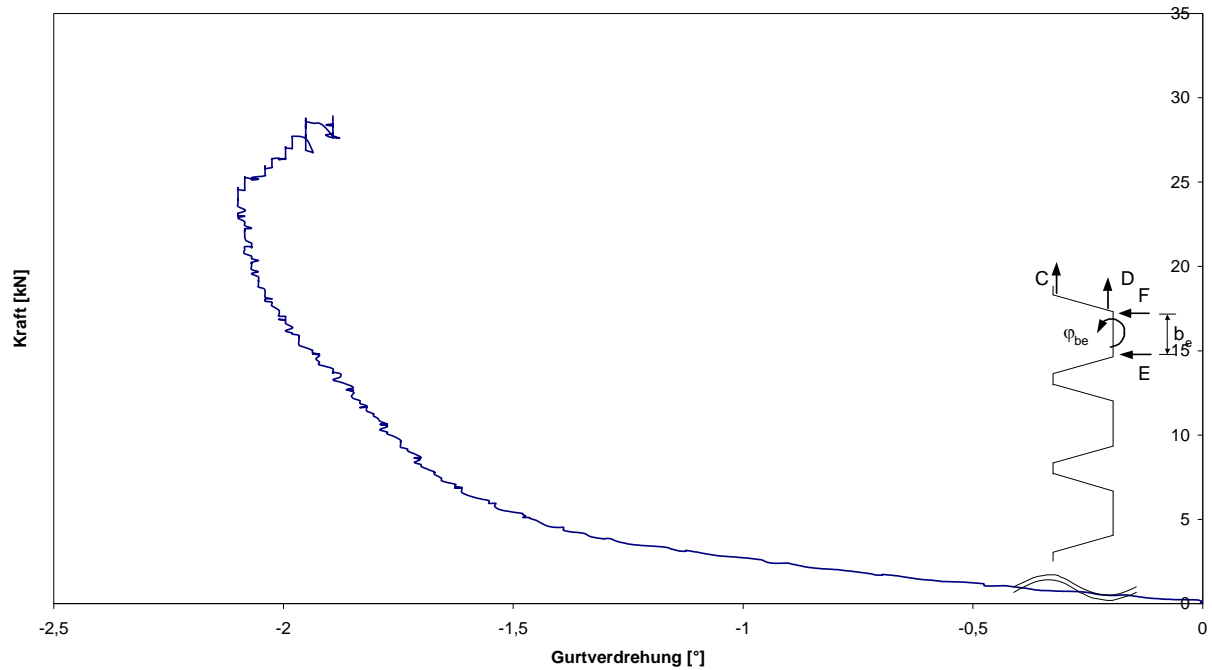


Abbildung A.47: Kraft-Verschiebungs-Diagramm

**Versuch 4**



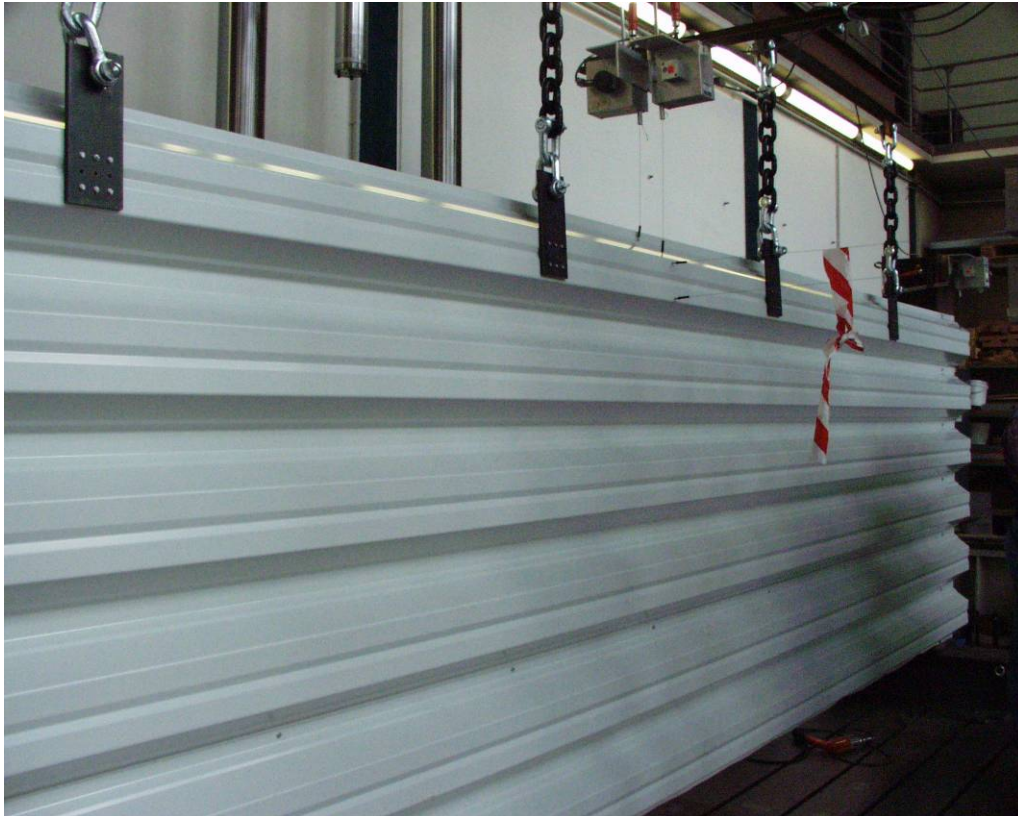
**Abbildung A.48: Kraft-Gurtverdrehungs-Diagramm**

**A.5 Versuch 5**

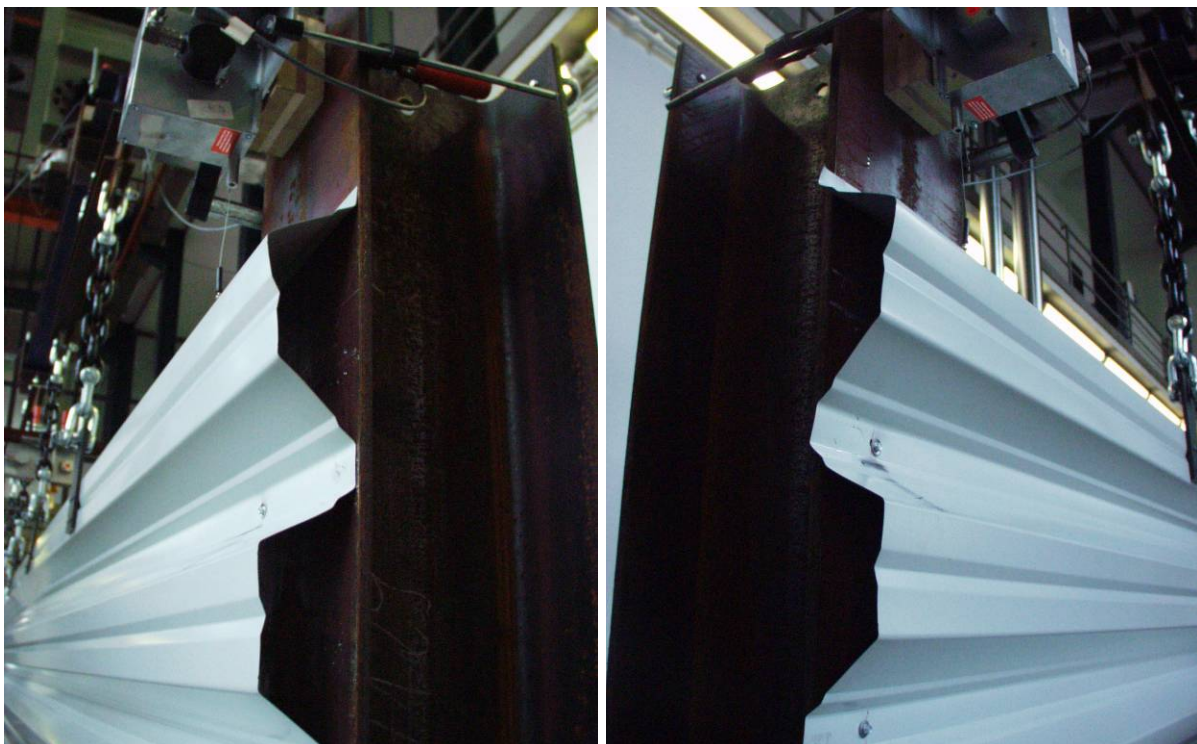
Versuch	Profil	Blechdicke	Stützweite	Hebelarm	Belastung
		[mm]	[m]	[mm]	
5	85/280	1,00	6,0	0	WA

**Tabelle A.5: Versuchsparameter**

Das Versagen trat im Bereich der Verbindungen des schmalen Gurtes mit der Unterkonstruktion durch Langlochbildung ein. Nach dem Versagen der ersten Verbindung kam es zu einem starken Lastabfall. Anschließend konnte die Belastung wieder bis zum Versagen der zweiten Verbindung (gleiche Rippe, anderes Auflager) gesteigert werden.

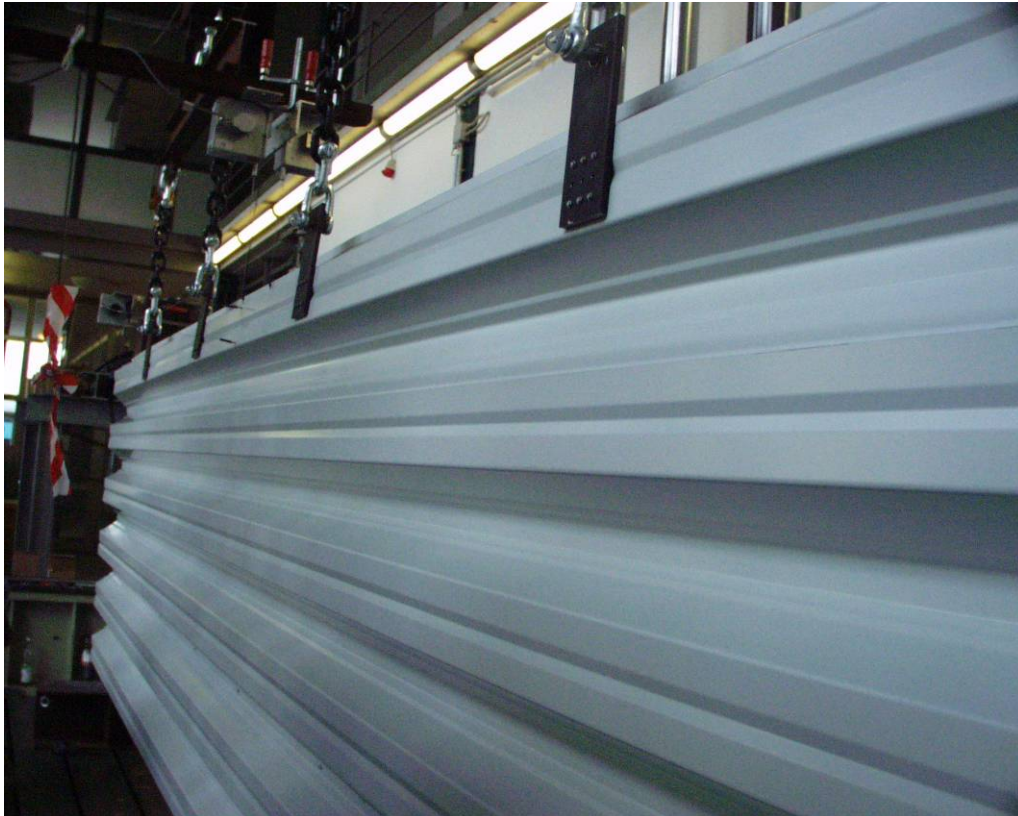


**Abbildung A.49: Versuchsaufbau**



**Abbildung A.50: Profilverformung am Auflager**



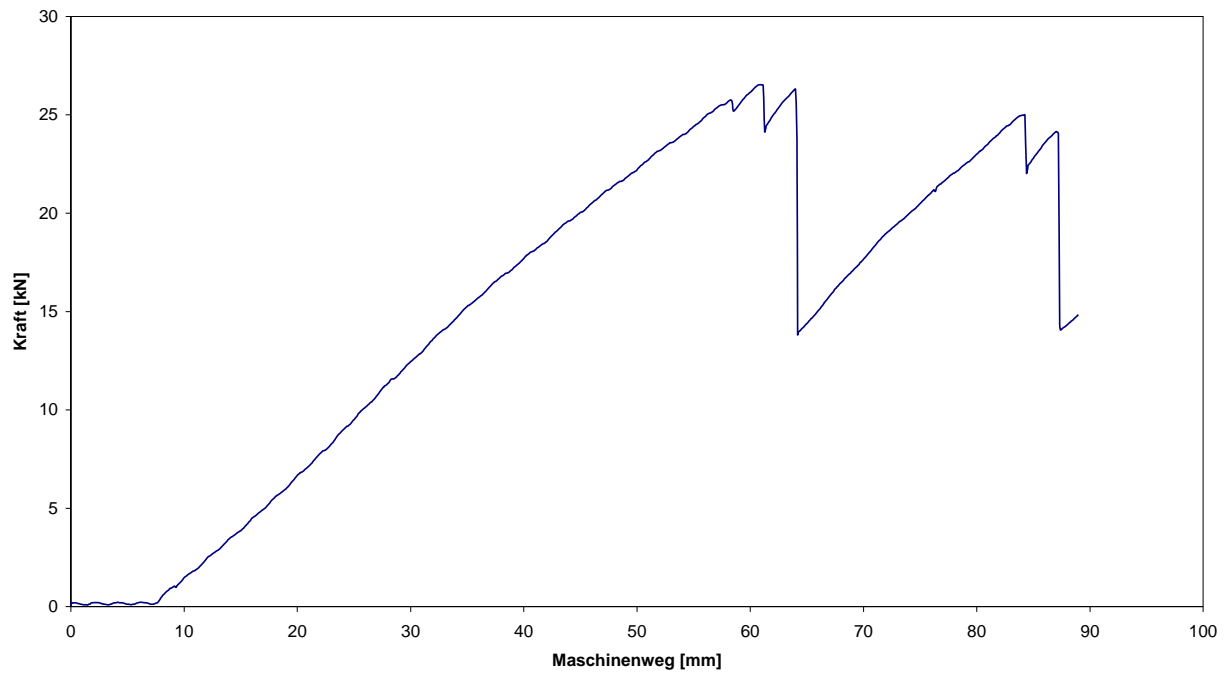


**Abbildung A.51: Profilverformung in Bauteilmitte**



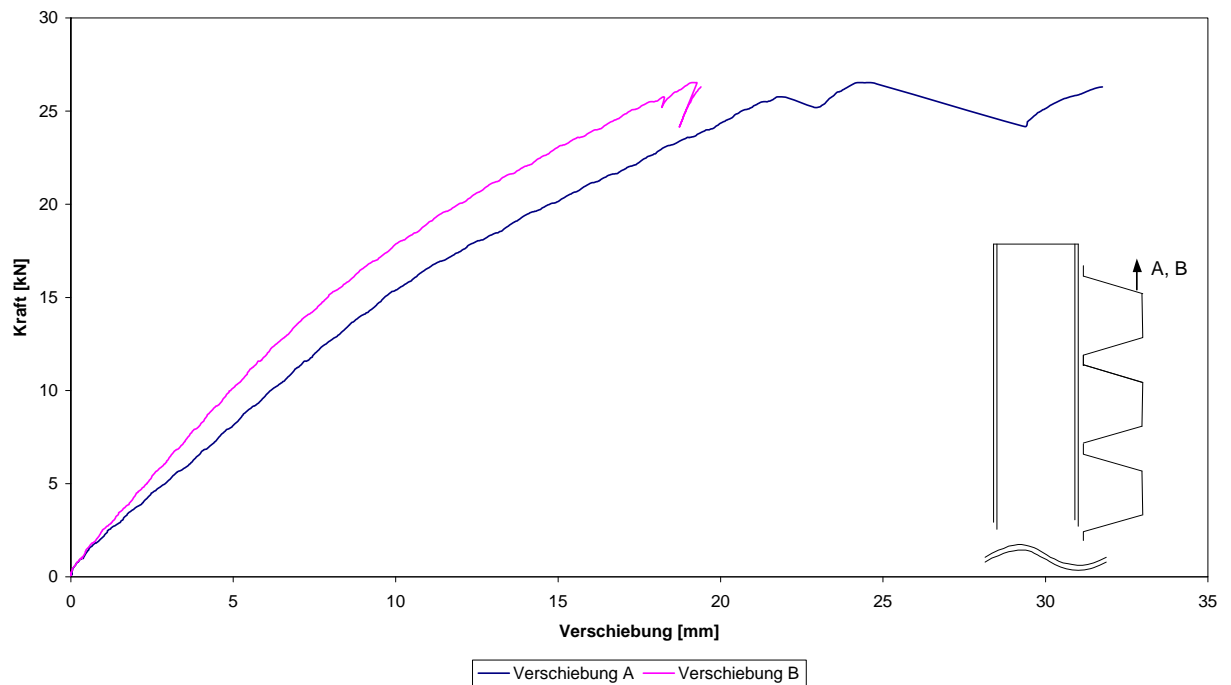
**Abbildung A.52: Profilverformung am Auflager nach dem Versagen der ersten Verbindung**

**Versuch 5**



**Abbildung A.53: Kraft-Maschinenweg-Diagramm Versuch 5**

**Versuch 5**



**Abbildung A.54: Kraft-Verschiebungs-Diagramm**

Versuch 5

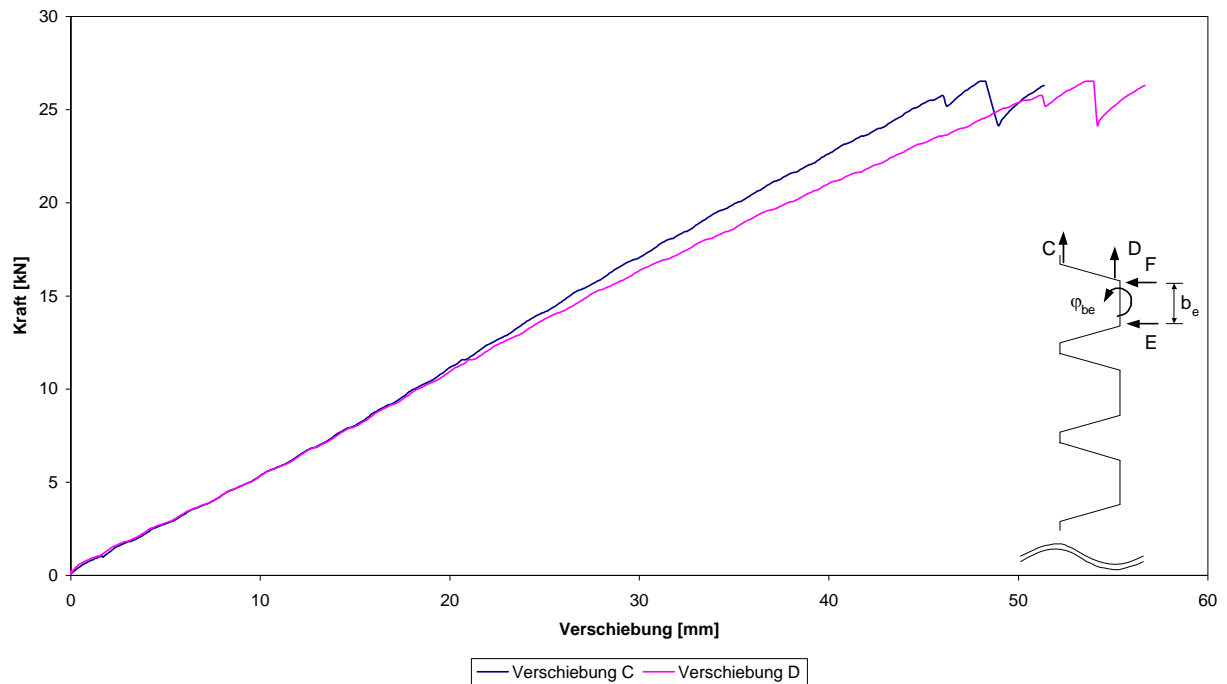


Abbildung A.55: Kraft-Verschiebungs-Diagramm

Versuch 5

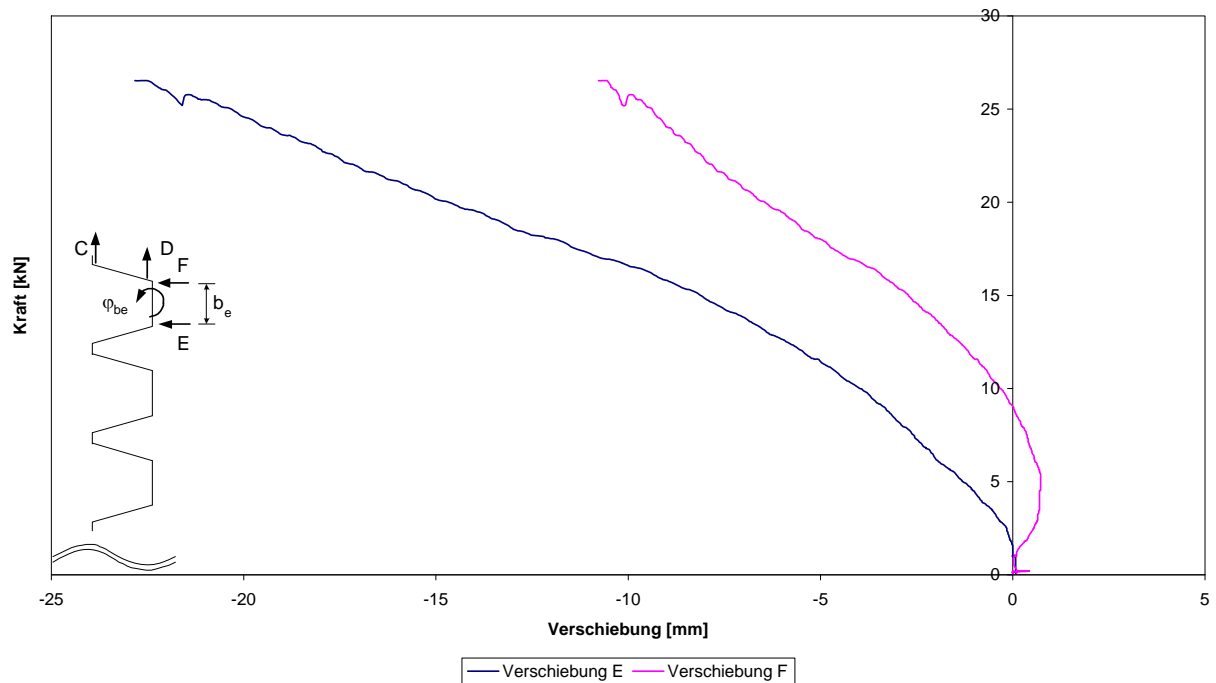


Abbildung A.56: Kraft-Verschiebungs-Diagramm



Versuch 5

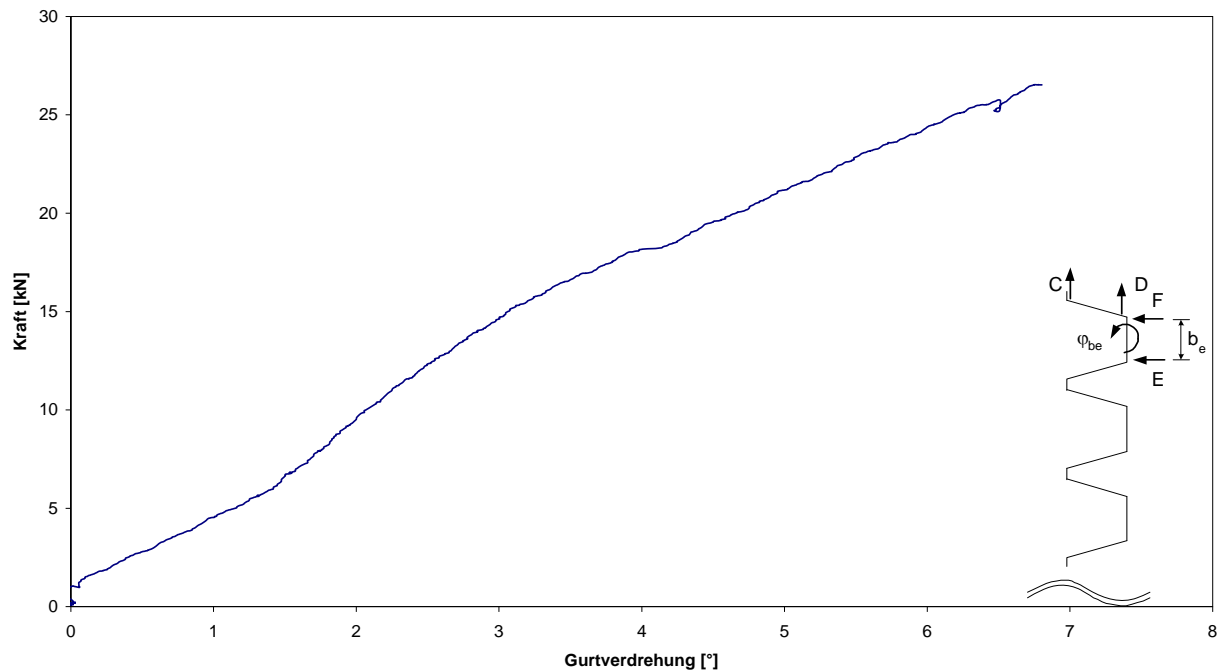


Abbildung A.57: Kraft-Gurtverdrehungs-Diagramm

A.6 Versuch 6

Versuch	Profil	Blechdicke	Stützweite	Hebelarm	Belastung
		[mm]	[m]	[mm]	
6	85/280	1,50	6,0	0	WA

Tabelle A.6: Versuchsparameter

Das Versagen trat im Bereich der Verbindungen des schmalen Gurtes mit der Unterkonstruktion durch Langlochbildung ein. Nach dem Versagen der ersten Verbindung kam es zu einem starken Lastabfall. Anschließend konnte die Belastung wieder bis zum Versagen der zweiten Verbindung (gleiche Rippe, anderes Auflager) gesteigert werden.



**Abbildung A.58: Versuchsaufbau**



**Abbildung A.59: Versuchsaufbau Rückseite**



**Abbildung A.60: Profilverformung in Feldmitte**



**Abbildung A.61: Versagen der Verbindung**

Versuch 6

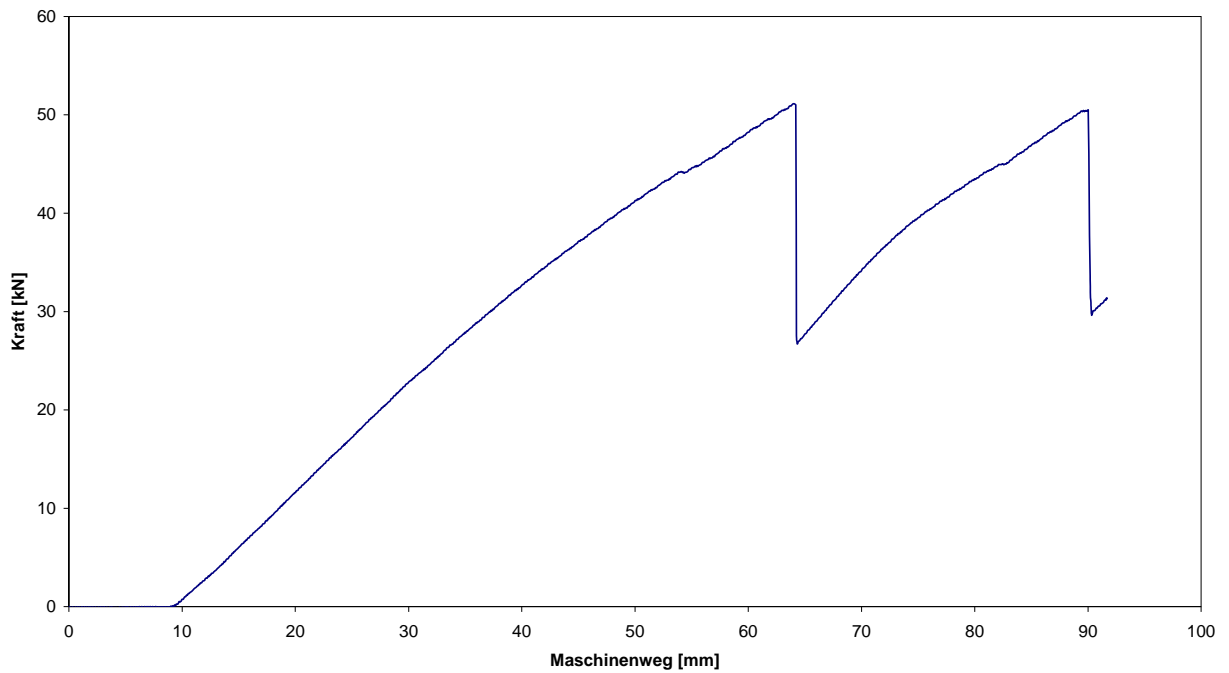


Abbildung A.62: Kraft-Maschinenweg-Diagramm Versuch 6

Versuch 6

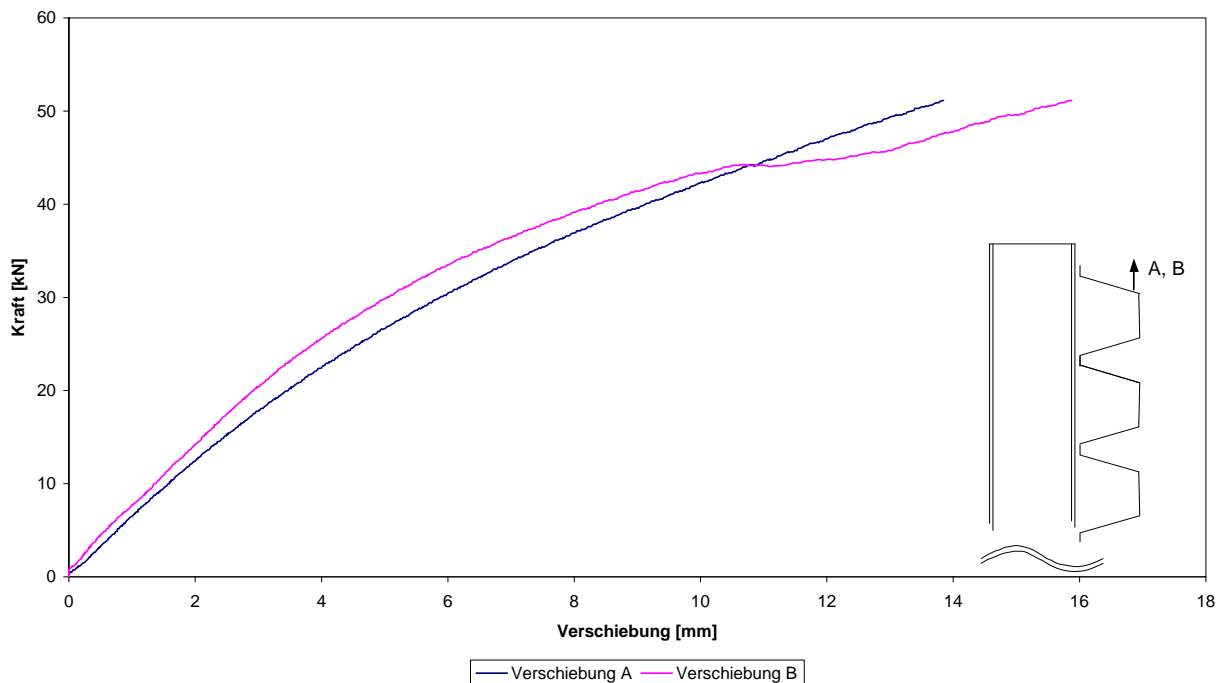


Abbildung A.63: Kraft-Verschiebungs-Diagramm

Versuch 6

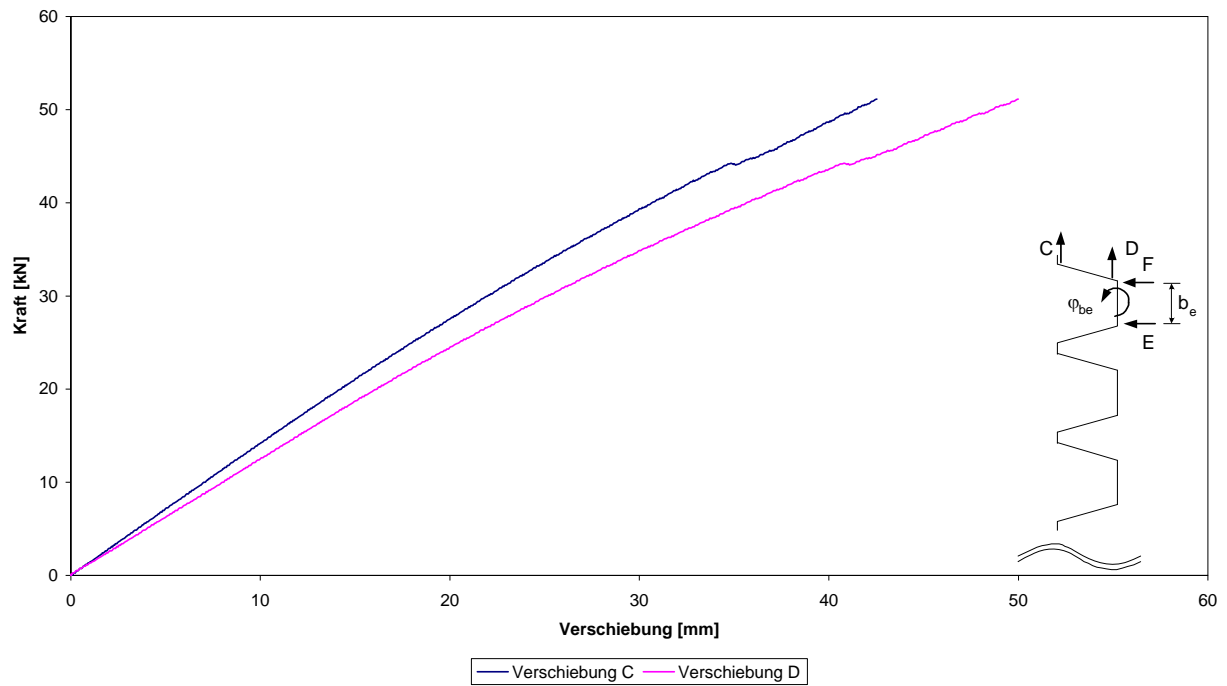


Abbildung A.64: Kraft-Verschiebungs-Diagramm

Versuch 6

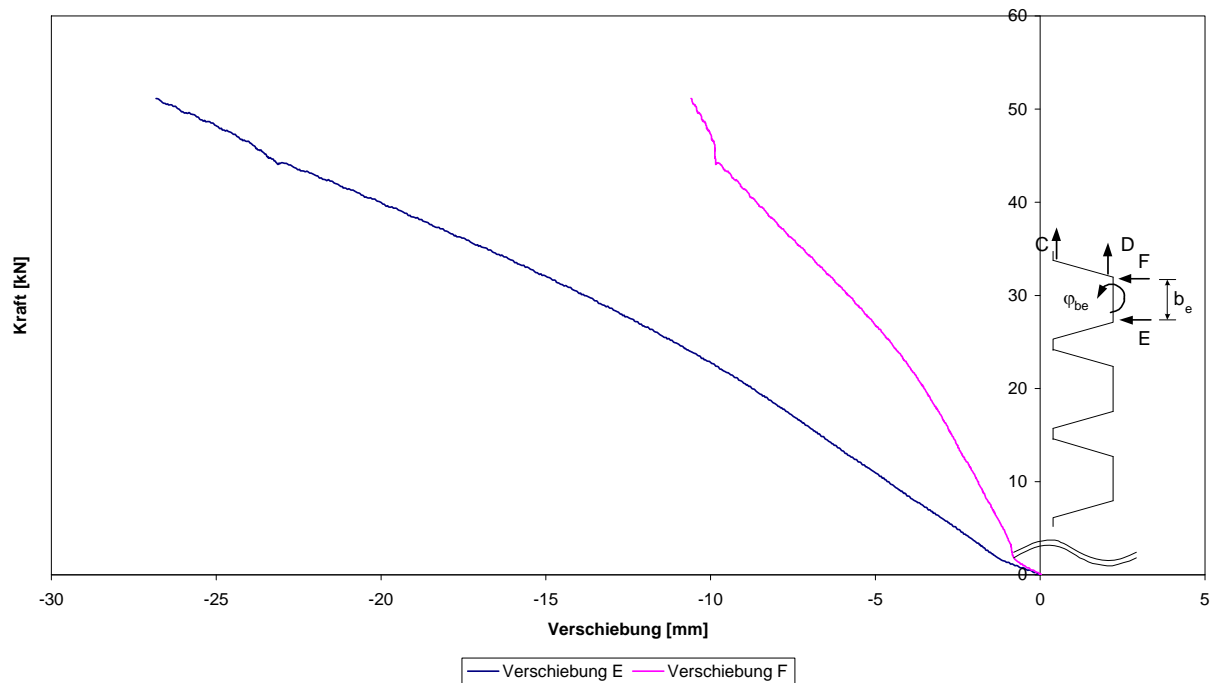
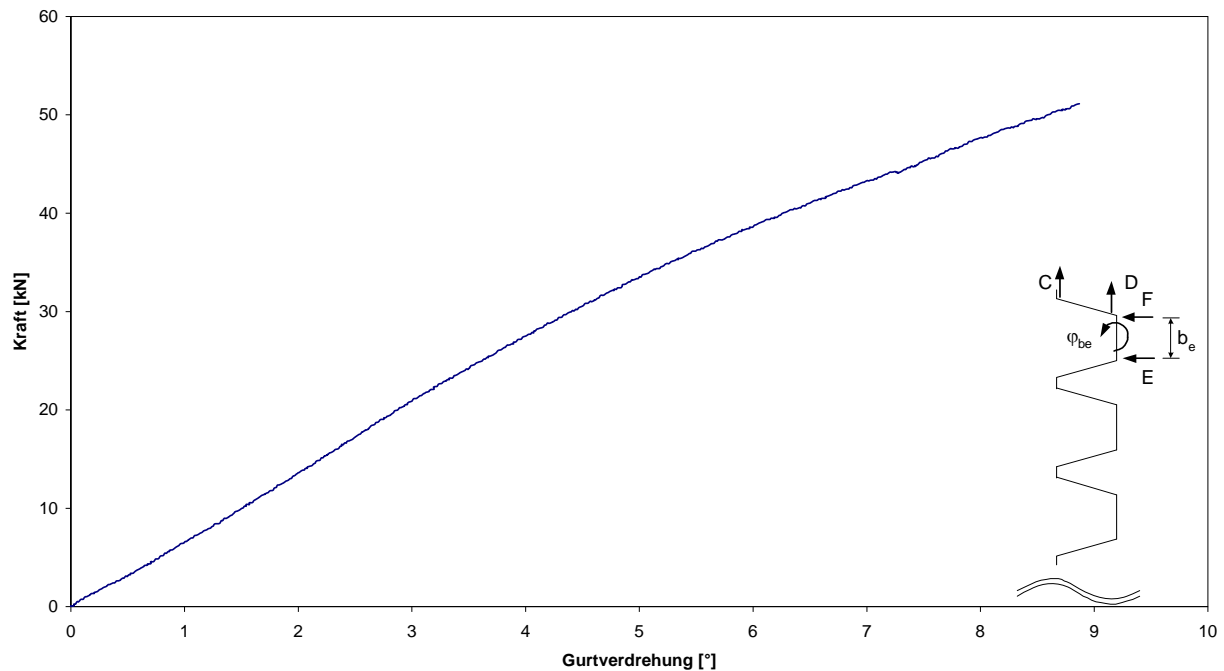


Abbildung A.65: Kraft-Verschiebungs-Diagramm

**Versuch 6**



**Abbildung A.66: Kraft-Gurtverdrehungs-Diagramm**

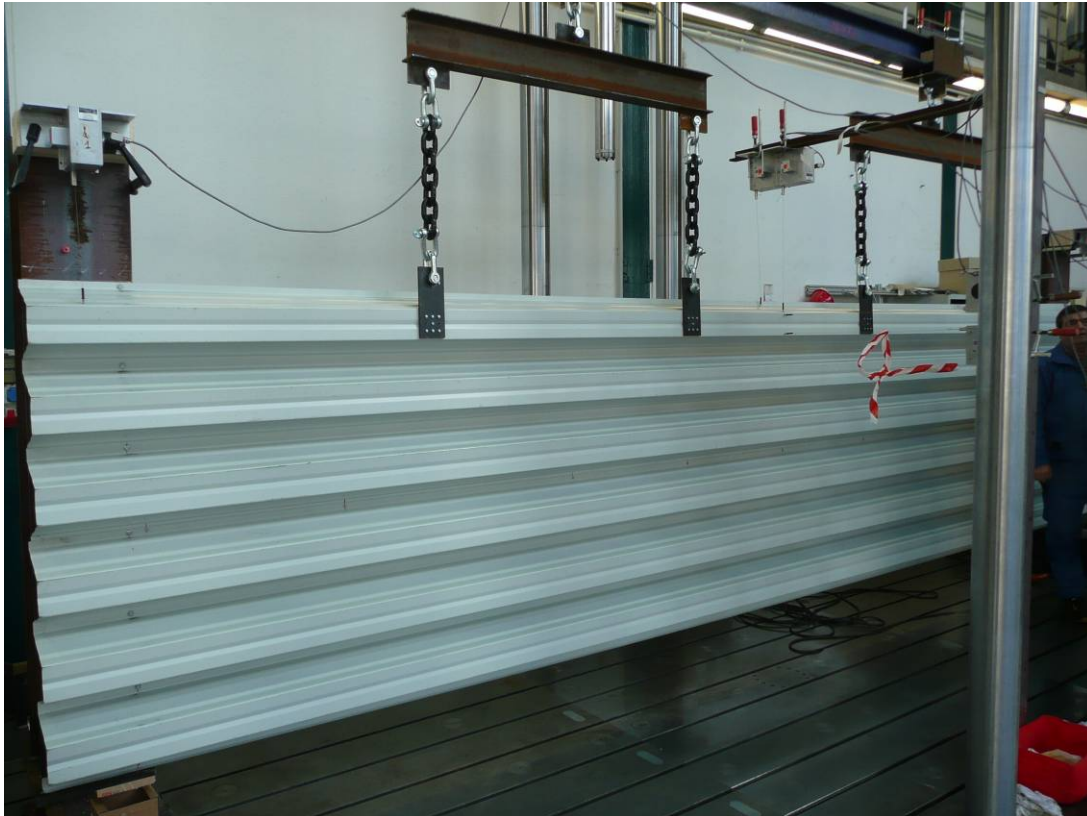
**A.7 Versuch 7**

Versuch	Profil	Blechdicke	Stützweite	Hebelarm	Belastung
		[mm]	[m]	[mm]	
7	160/250	0,75	6,0	0	WA

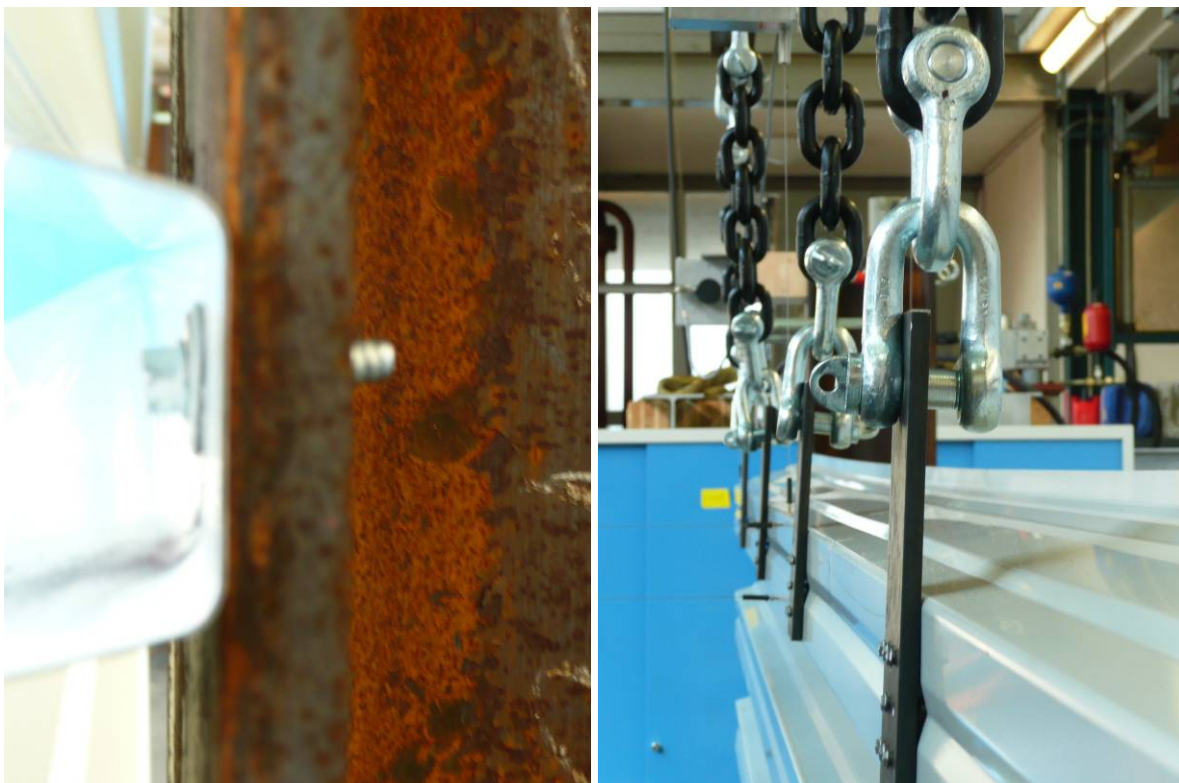
**Tabelle A.7: Versuchsparameter**

Das Versagen trat im Bereich der Verbindungen des schmalen Gurtes mit der Unterkonstruktion durch Langlochbildung ein. Vor dem Versagen an der Verbindung war es zu einem leichten Lastabfall beim Einfallen einer Beule in Feldmitte gekommen. Anschließend konnte die Belastung aber wieder gesteigert werden.





**Abbildung A.67: Versuchsaufbau**



**Abbildung A.68: Verschraubung mit der Unterkonstruktion und Lasteinleitung**

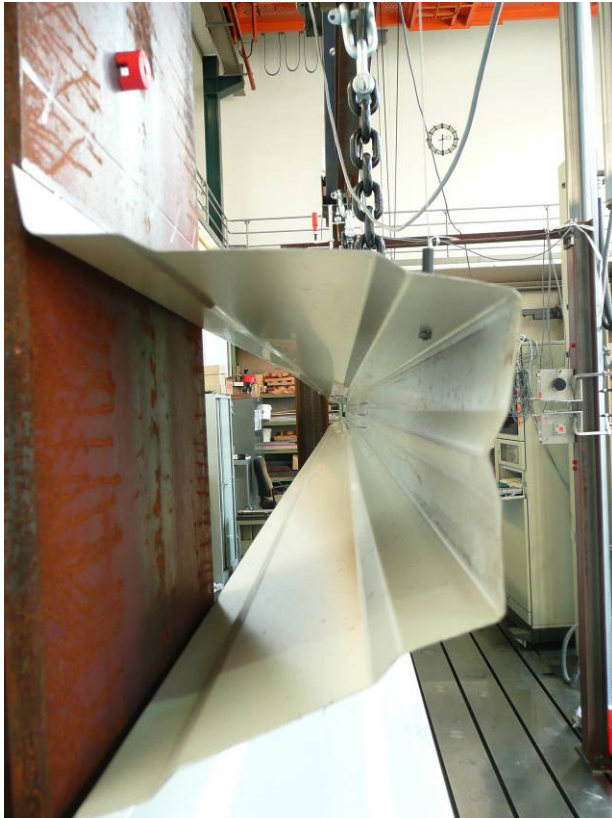


**Abbildung A.69: Lasteinleitung**

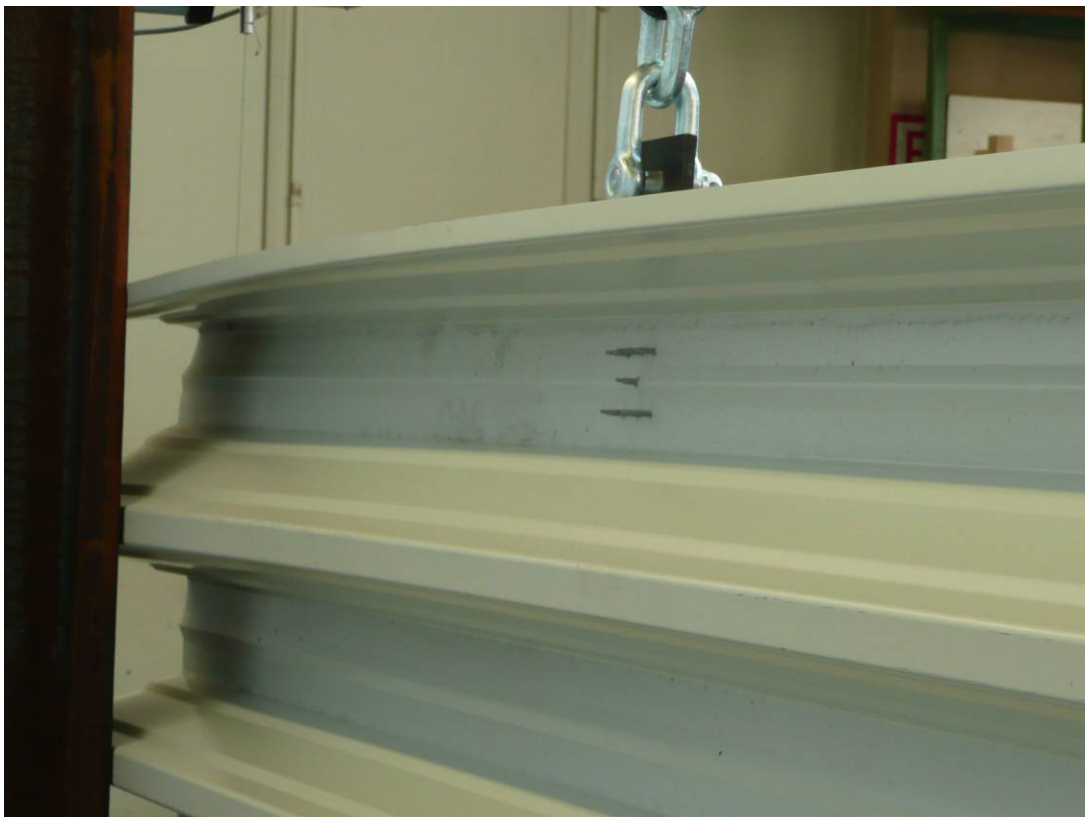


**Abbildung A.70: Lasteinleitung**





**Abbildung A.71: Profilverformung**



**Abbildung A.72: Profilverformung von der Rückseite aus**



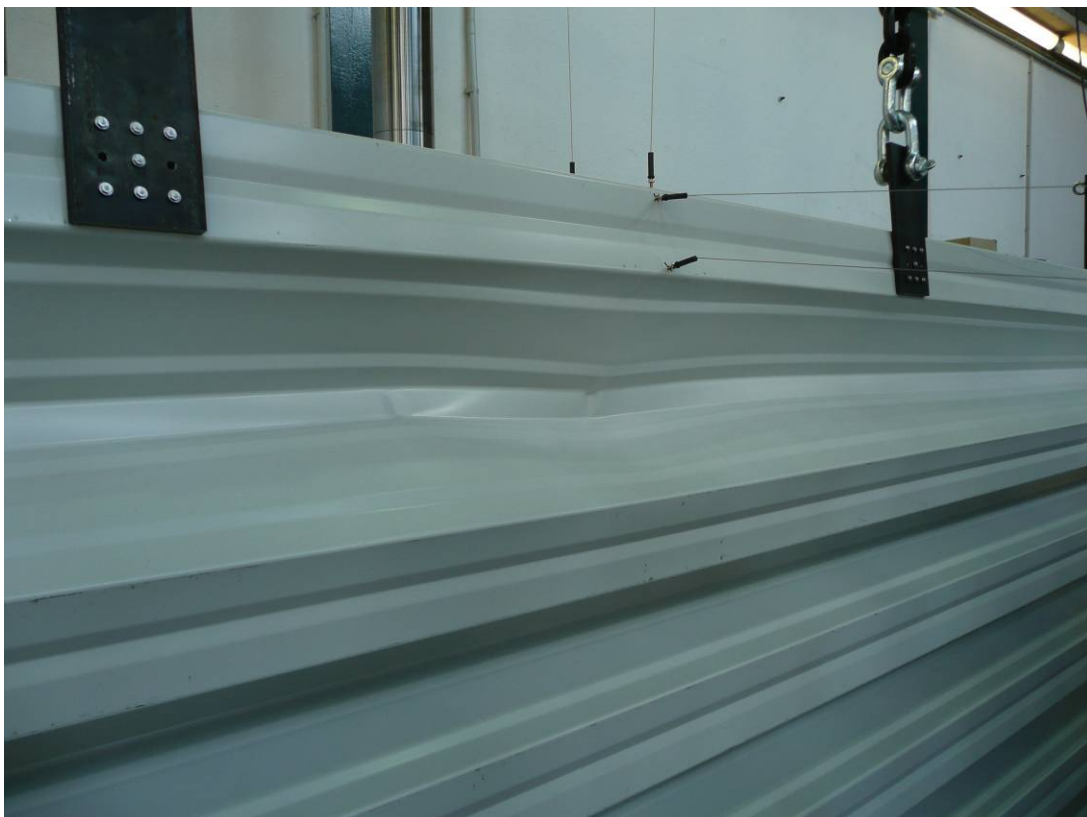
**Abbildung A.73: Profilverformung**



**Abbildung A.74: Stegkrüppeln am Auflager**



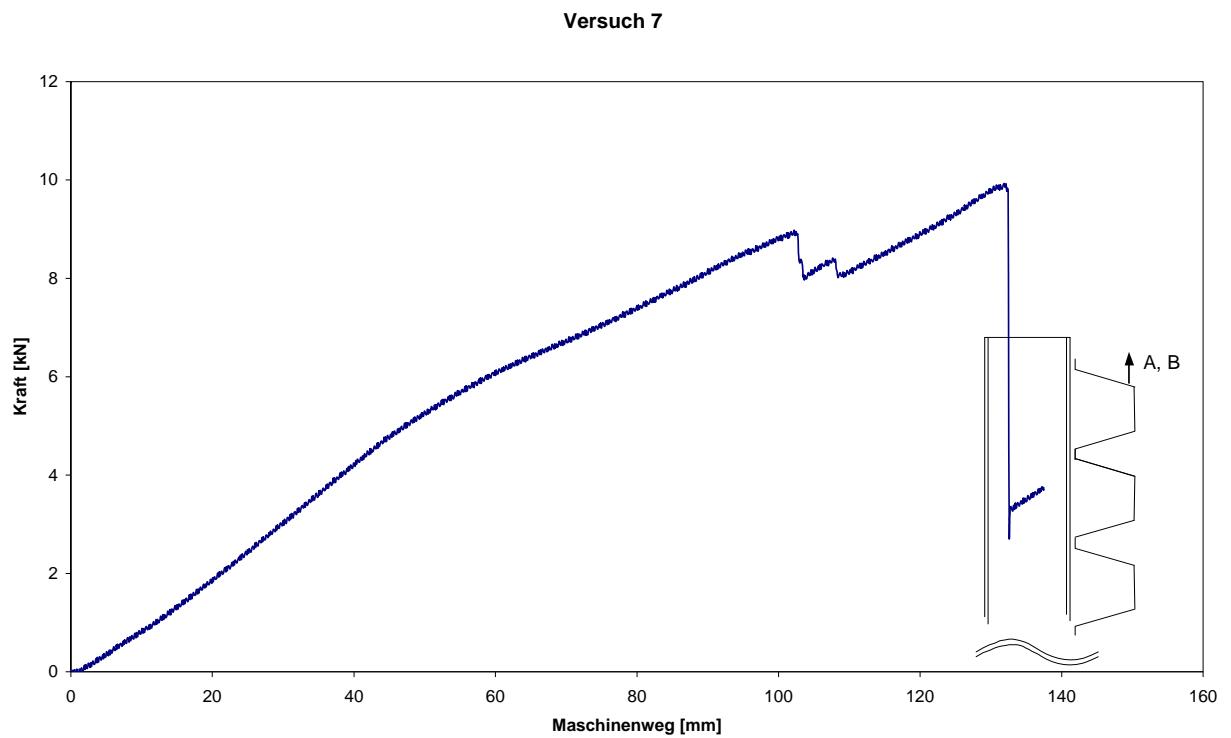
**Abbildung A.75: Stegkrüppeln am Auflager**



**Abbildung A.76: Beule in Feldmitte**



**Abbildung A.77: Versagen der Verbindung**



**Abbildung A.78: Kraft-Maschinenweg-Diagramm Versuch 7**

Versuch 7

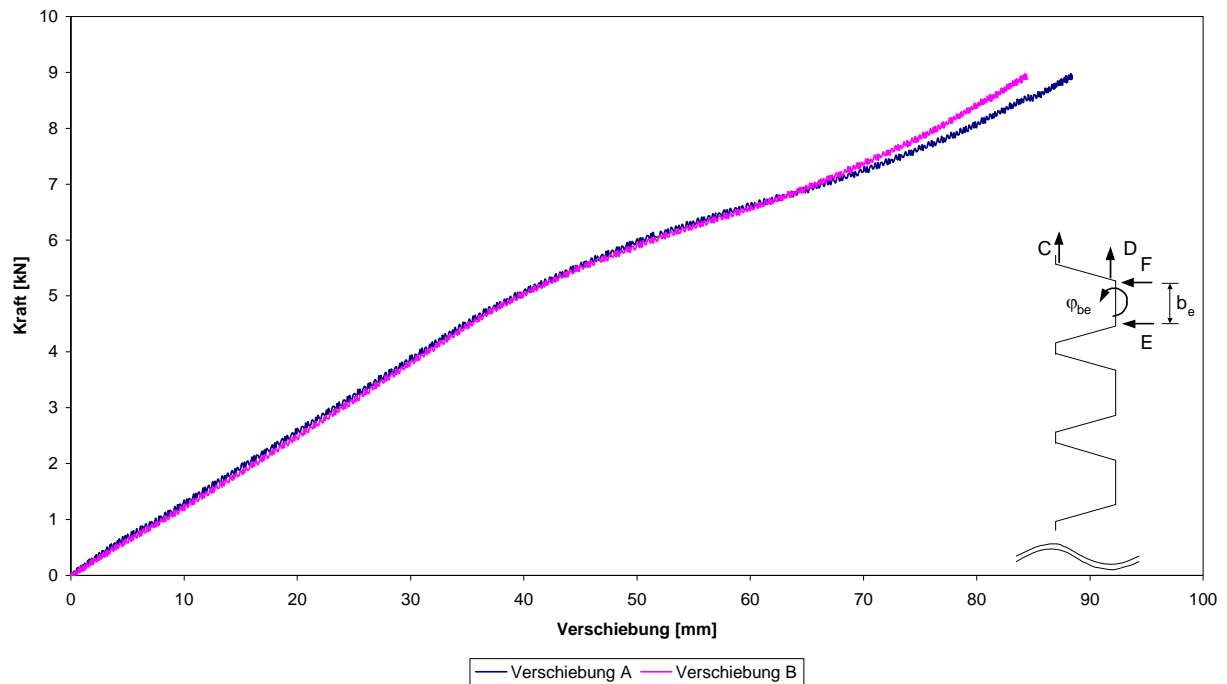


Abbildung A.79: Kraft-Verschiebungs-Diagramm

Versuch 7

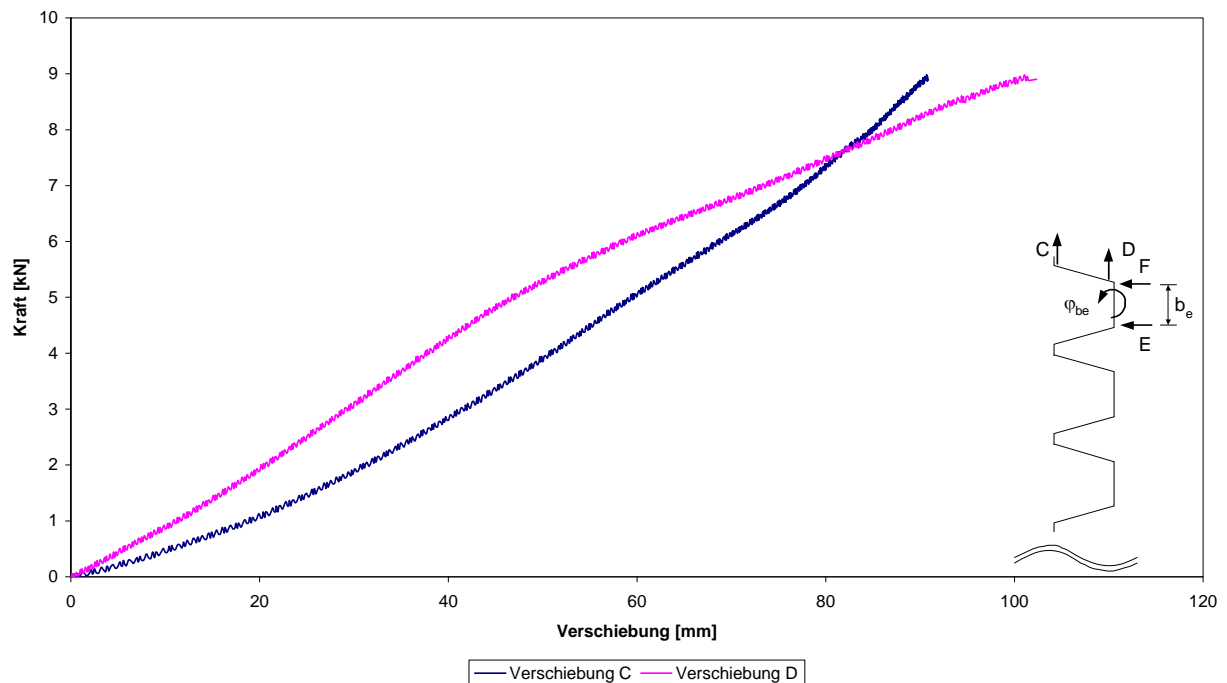


Abbildung A.80: Kraft-Verschiebungs-Diagramm

Versuch 7

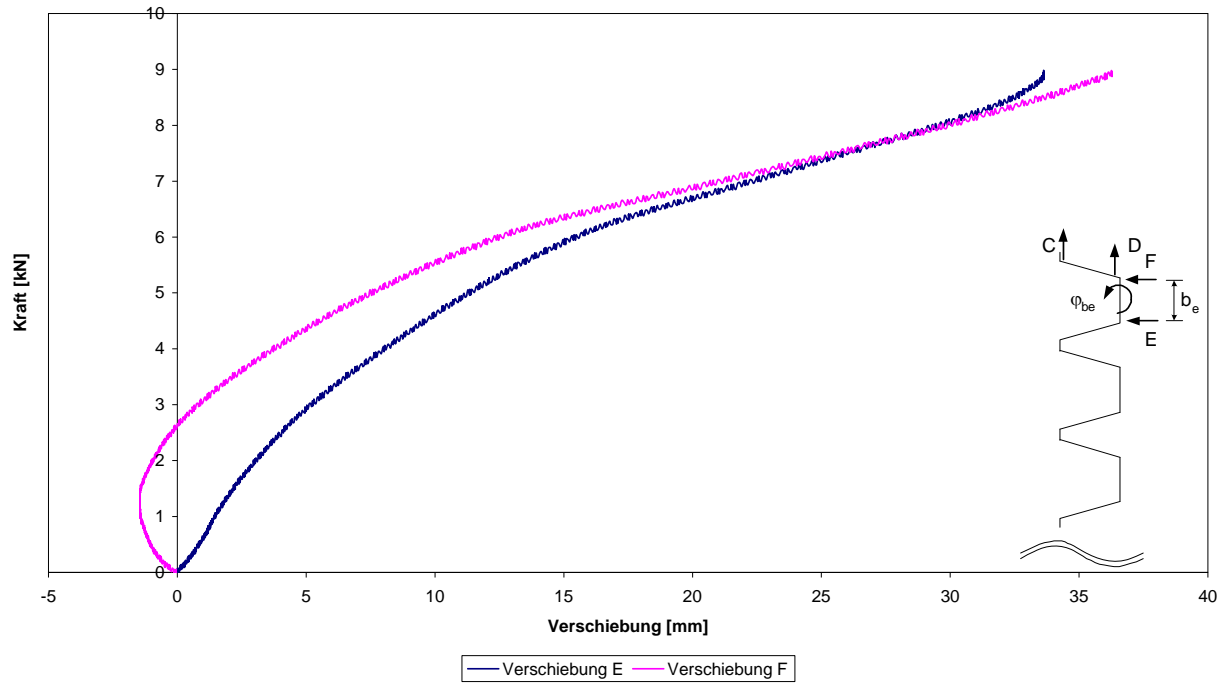


Abbildung A.81: Kraft-Verschiebungs-Diagramm

Versuch 7

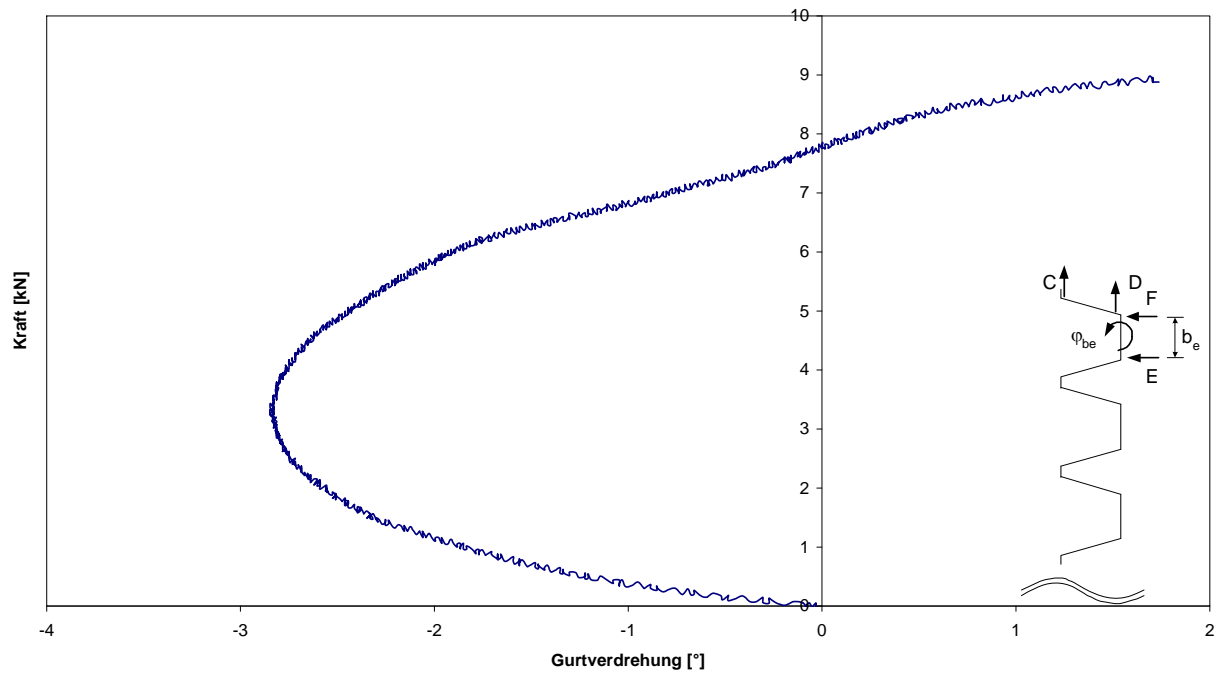


Abbildung A.82: Kraft-Gurtverdrehungs-Diagramm

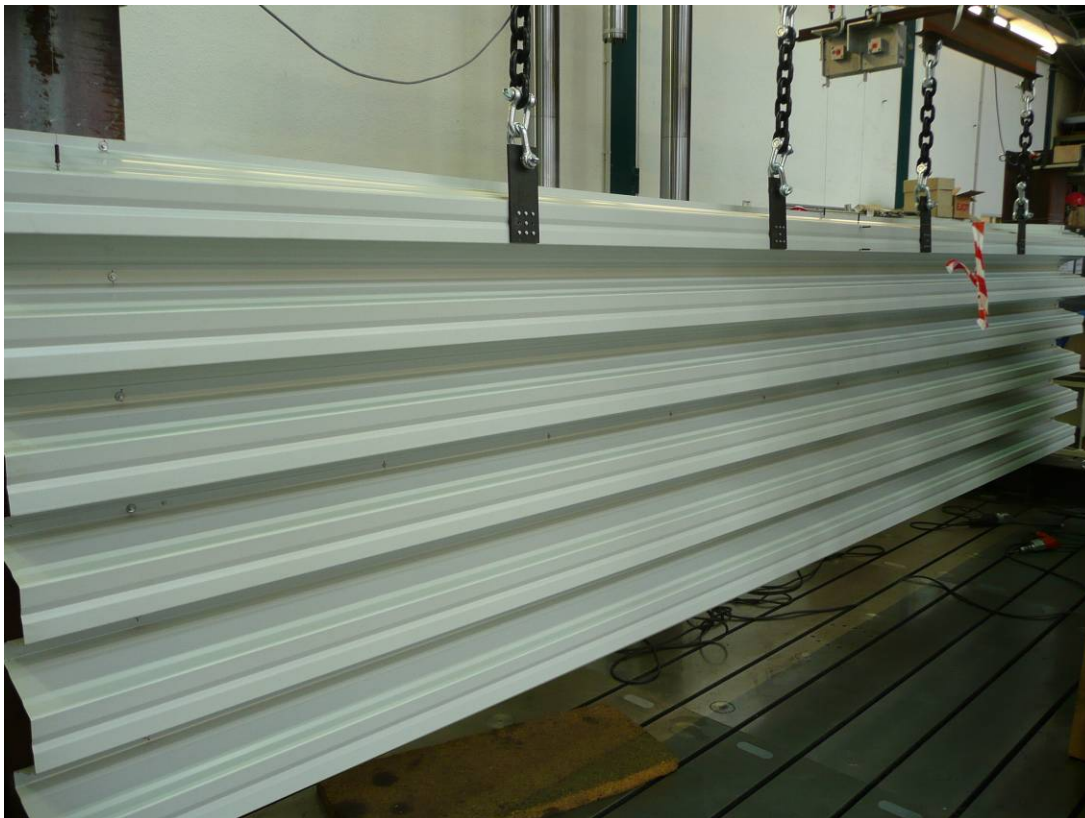


### A.8 Versuch 8

Versuch	Profil	Blechdicke	Stützweite	Hebelarm	Belastung
		[mm]	[m]	[mm]	
8	160/250	0,75	6,0	0	WA

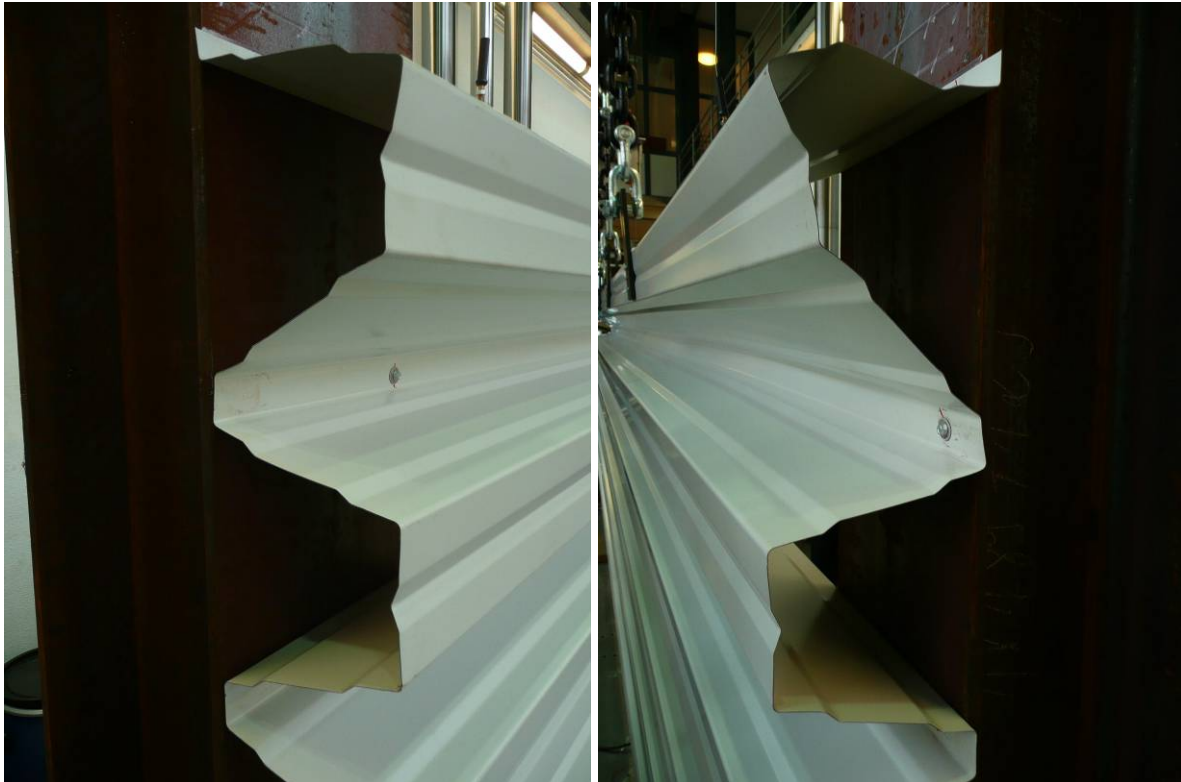
**Tabelle A.8: Versuchsparameter**

Das Versagen trat im Bereich der Verbindungen des schmalen Gurtes mit der Unterkonstruktion durch Langlochbildung ein. Vor dem Versagen an der Verbindung war es zu einem leichten Lastabfall beim Einfallen einer Beule in Feldmitte gekommen. Anschließend konnte die Belastung aber wieder gesteigert werden.



**Abbildung A.83: Versuchsaufbau**





**Abbildung A.84: Zunahme der Profilverformung**



**Abbildung A.85: Steglängswölbung**



**Abbildung A.86: Profilverformung**



**Abbildung A.87: Profilverformung**



**Abbildung A.88: Beule in Feldmitte**



**Abbildung A.89: Beule in Feldmitte und Versagen am Auflager**

Versuch 8

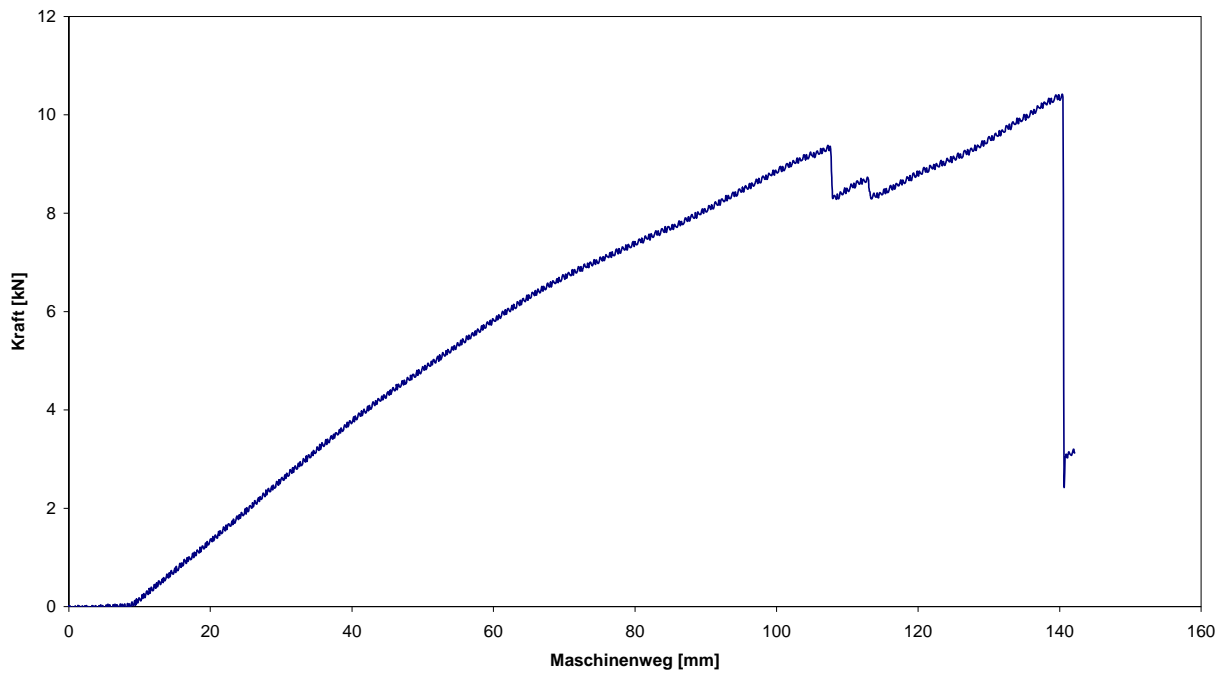


Abbildung A.90: Kraft-Maschinenweg-Diagramm Versuch 8

Versuch 8

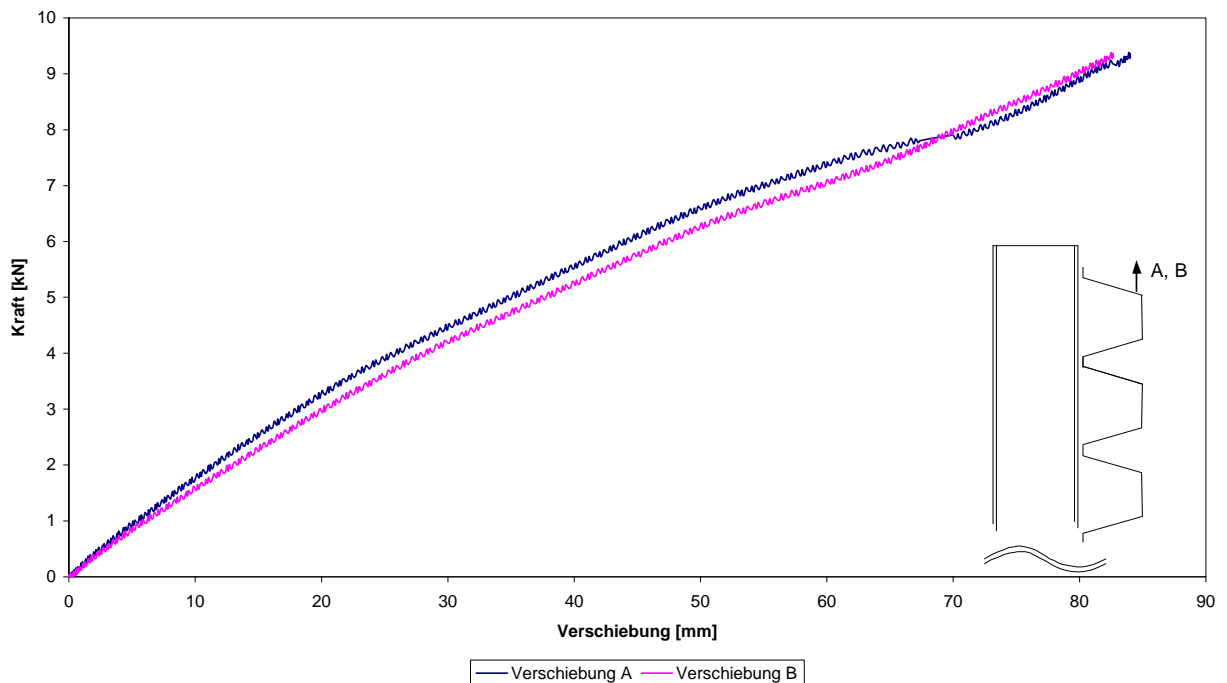


Abbildung A.91: Kraft-Verschiebungs-Diagramm

Versuch 8

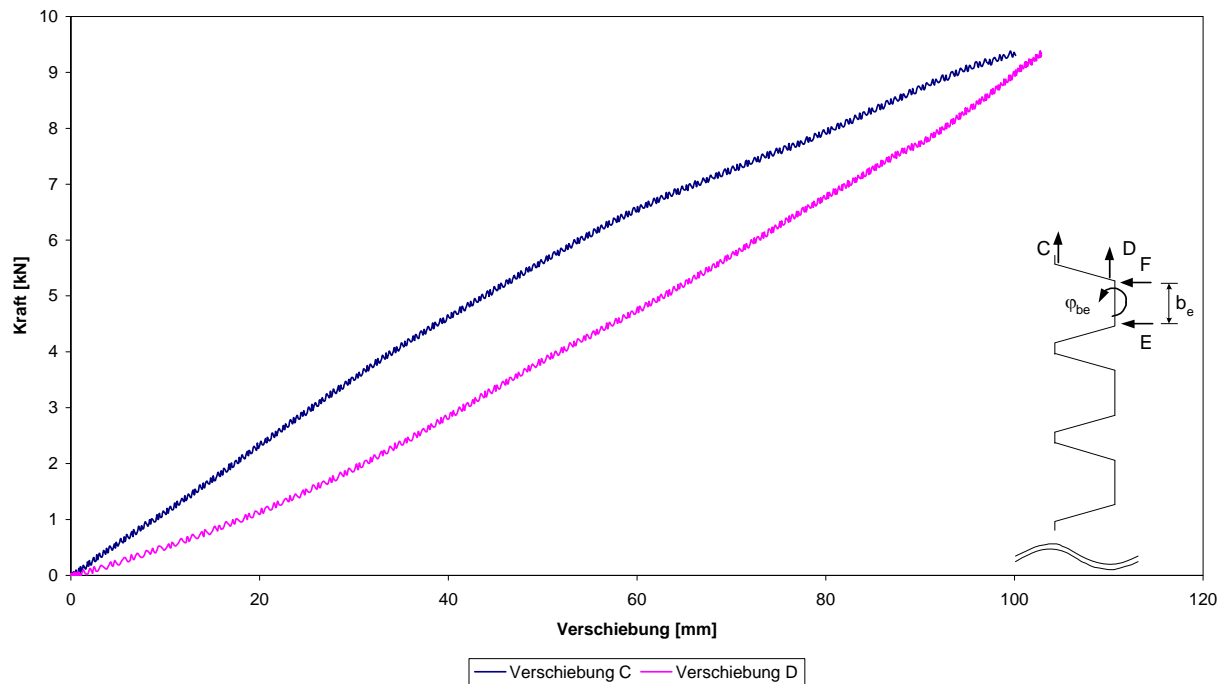


Abbildung A.92: Kraft-Verschiebungs-Diagramm

Versuch 8

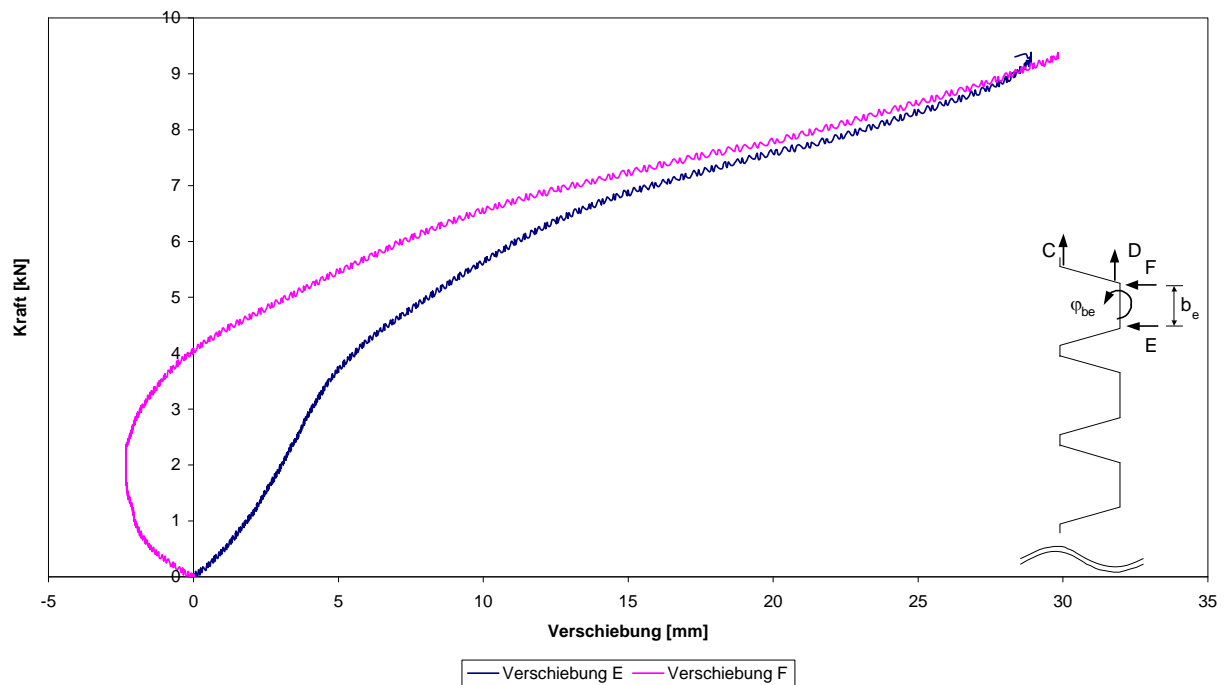


Abbildung A.93: Kraft-Verschiebungs-Diagramm







**Abbildung A.96: Lasteinleitung und Flachblechtafeln**



**Abbildung A.97: Rückseite mit Beule im Übergangsbereich Gurt-Steg**



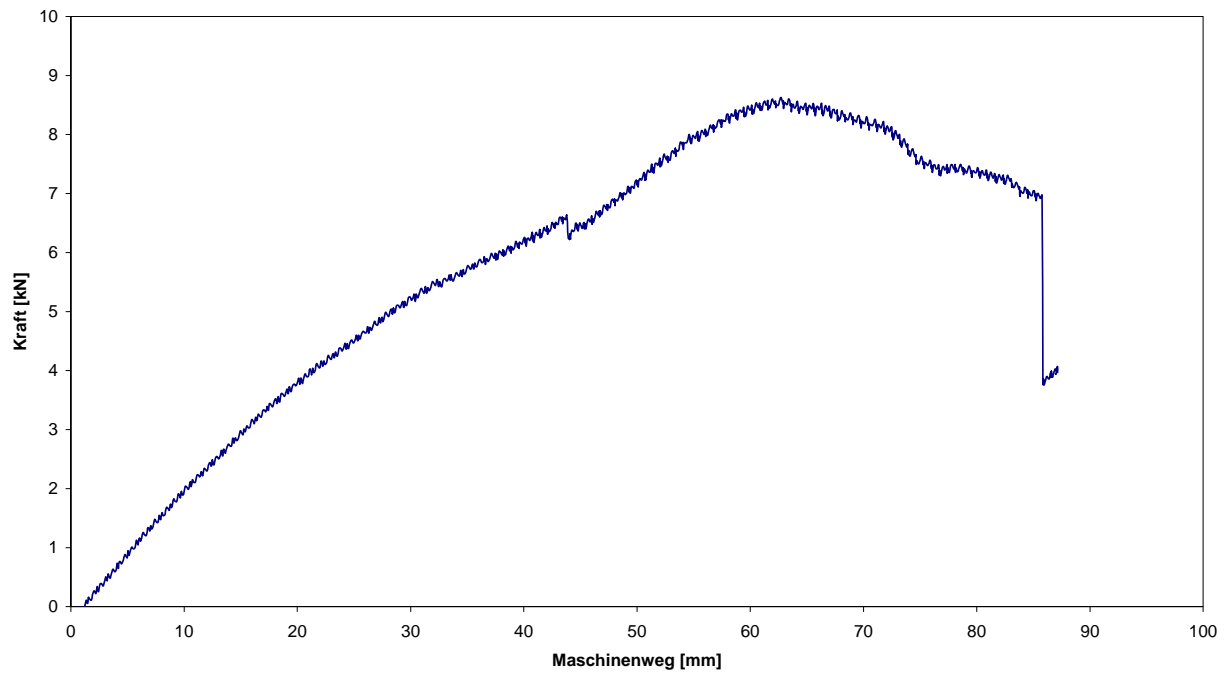


**Abbildung A.98: Gurtverdrehung**



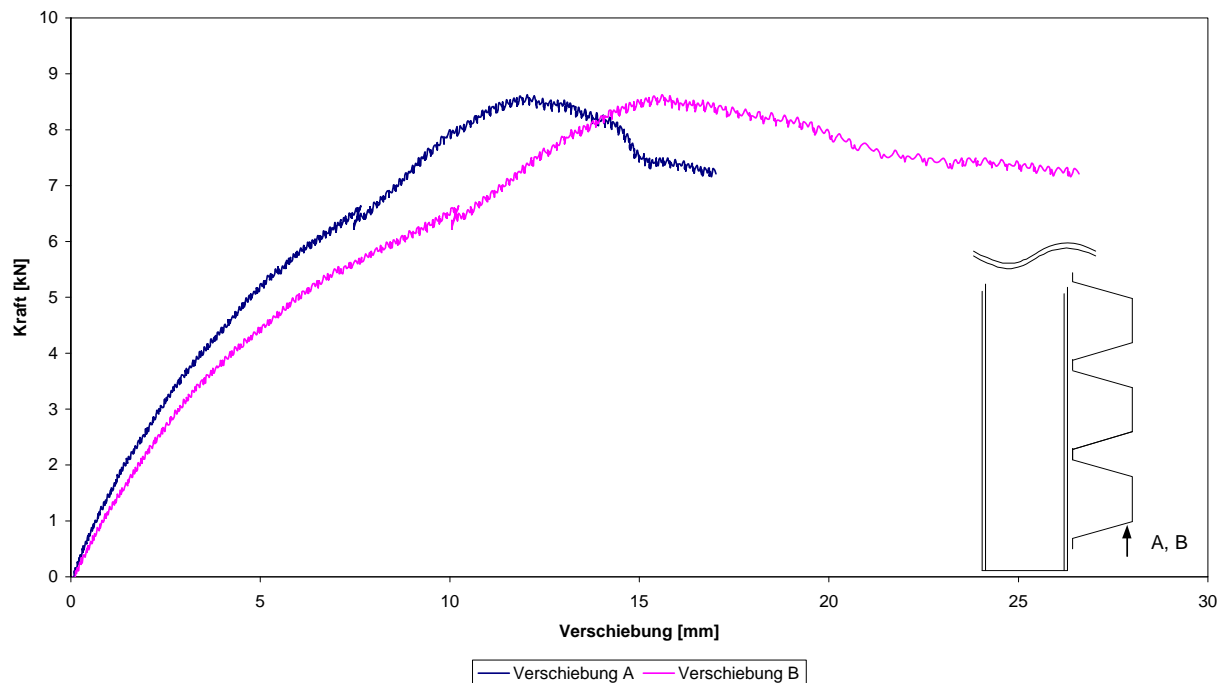
**Abbildung A.99: Gurtverdrehung in Feldmitte**

**Versuch 9**



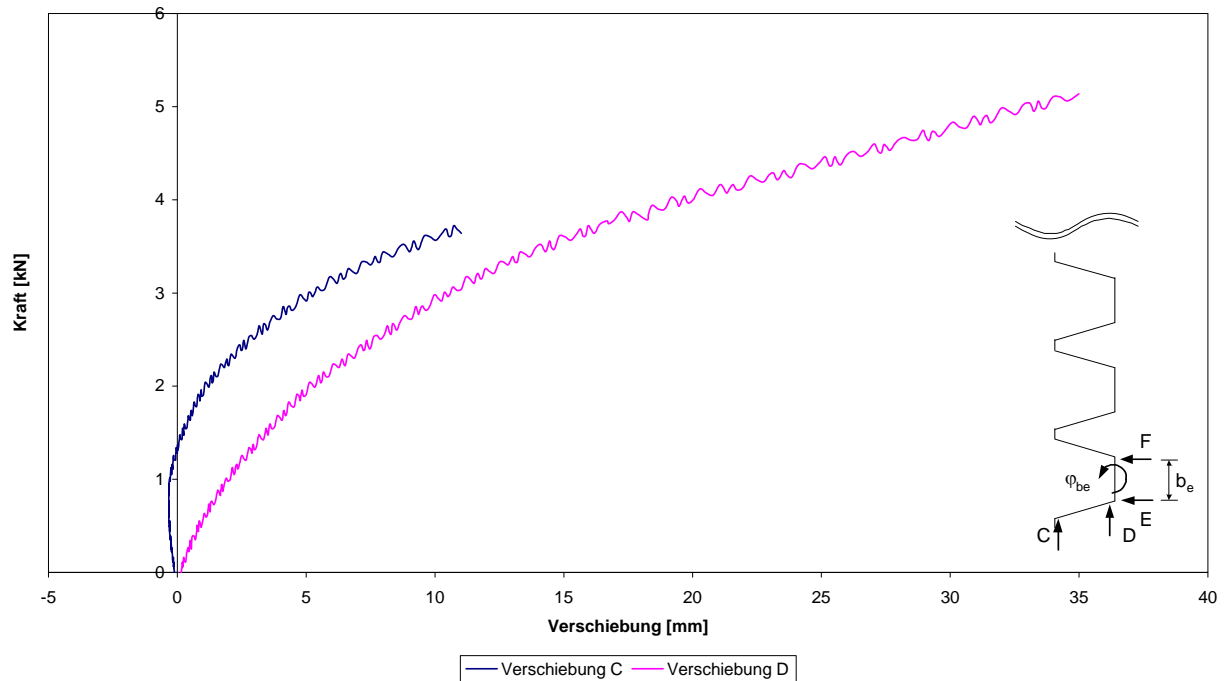
**Abbildung A.100: Kraft-Maschinenweg-Diagramm Versuch 9**

**Versuch 9**



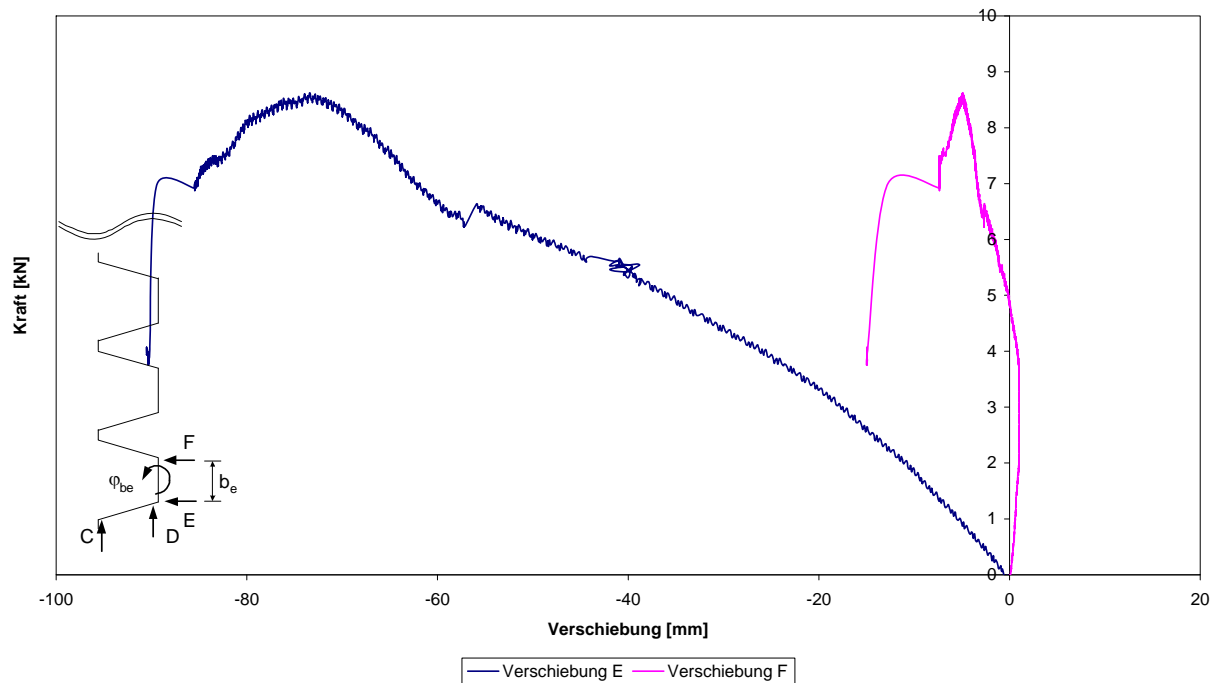
**Abbildung A.101: Kraft-Verschiebungs-Diagramm**

**Versuch 9**



**Abbildung A.102: Kraft-Verschiebungs-Diagramm**

**Versuch 9**



**Abbildung A.103: Kraft-Verschiebungs-Diagramm**

Versuch 9

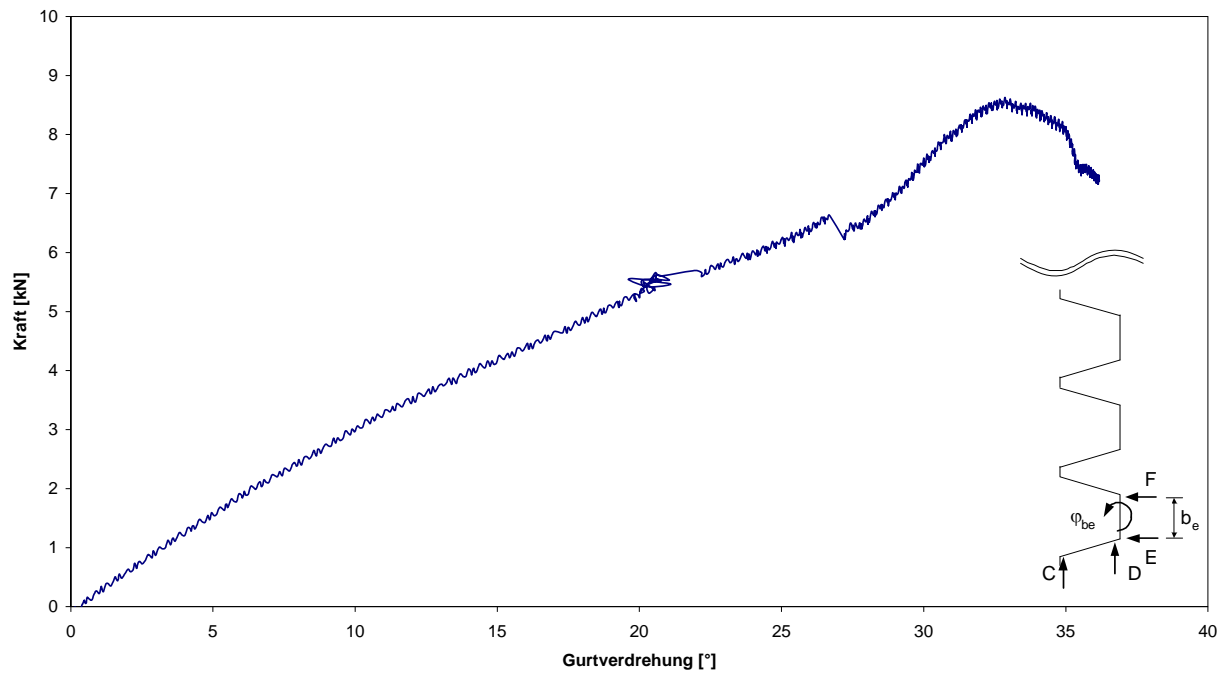


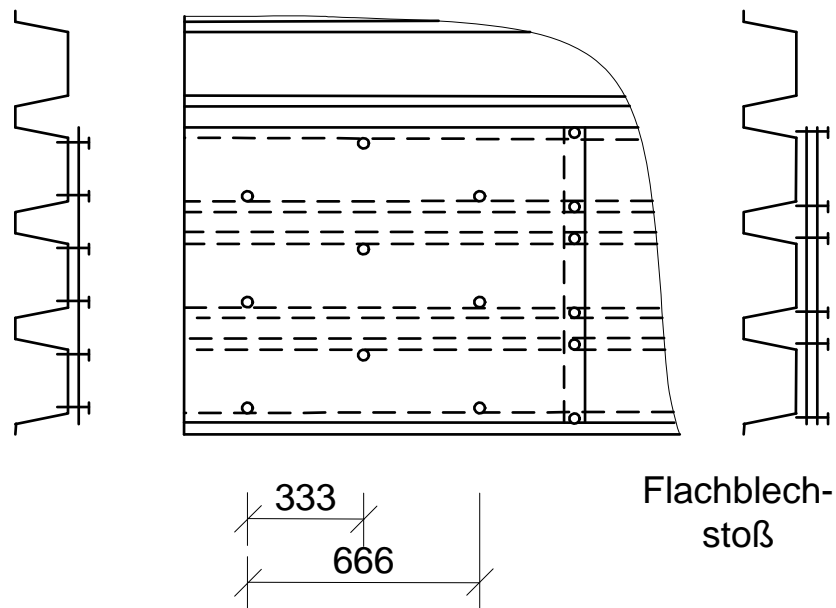
Abbildung A.104: Kraft-Gurtverdrechungs-Diagramm

A.10 Versuch 10

Versuch	Profil	Blechdicke	Stützweite	Hebelarm	Belastung
		[mm]	[m]	[mm]	
10	85/280	0,75	6,0	200	DS

Tabelle A.10: Versuchsparameter

Im Versuch 10 wurde der belastete Obergurt über eine Flachblechtafel (Nennblechdicke 0,75 mm) mit den beiden benachbarten Obergurten gekoppelt (Abbildung A.105).



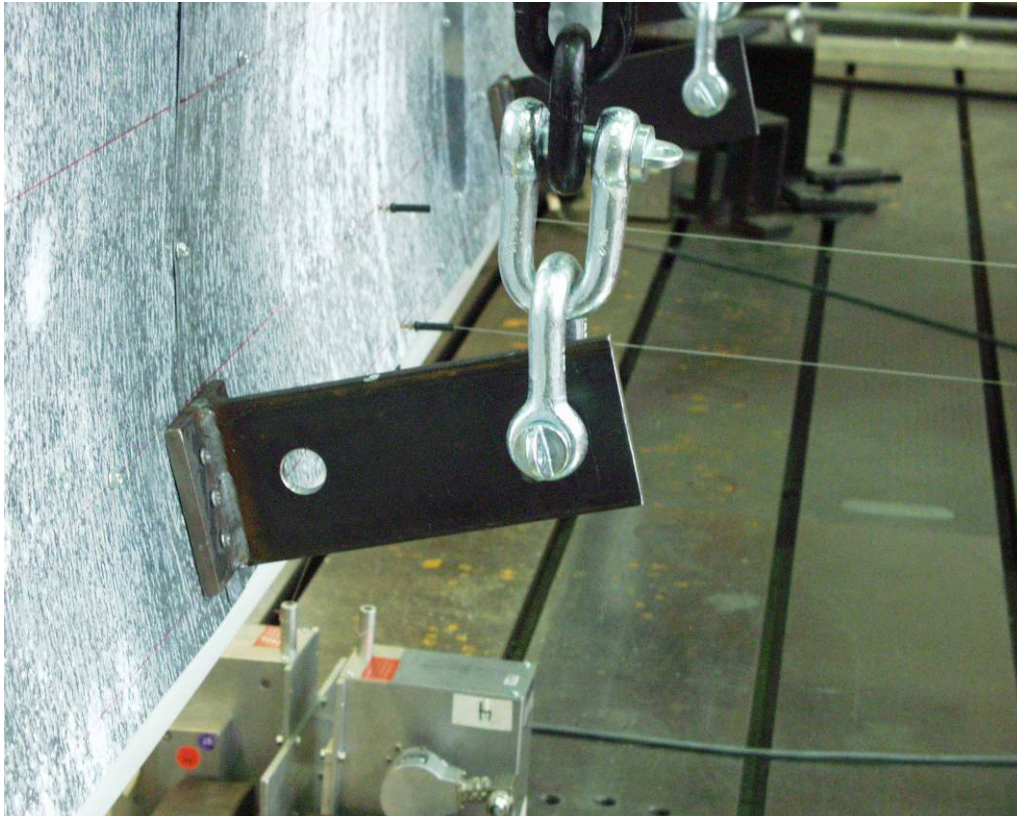
**Abbildung A.105: Befestigung des Flachblechs und Stoßbereich**

Der Versuch wurde nach Erreichen einer übermäßigen Gurtverformung abgebrochen.



**Abbildung A.106: Befestigung und Lasteinleitung**





**Abbildung A.107: Lasteinleitung**

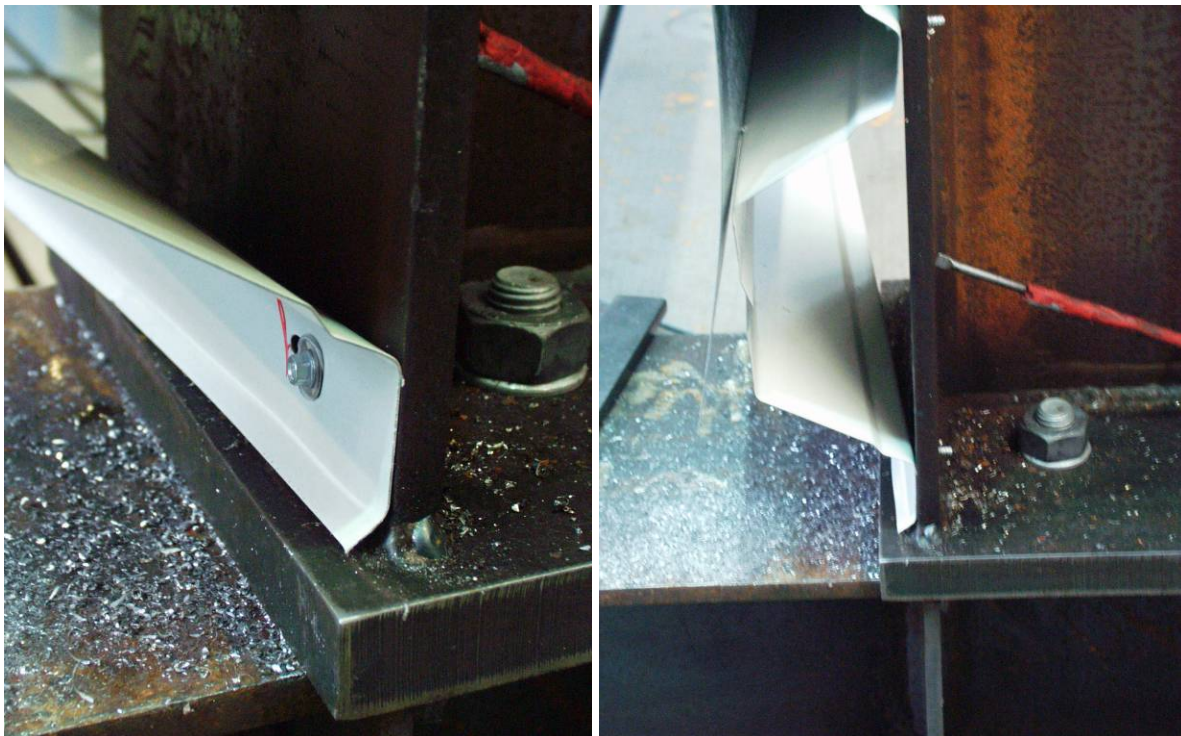


**Abbildung A.108: Vergleich der Gurtverformung im Feld und am Auflager**





**Abbildung A.109: Gurtverformung**



**Abbildung A.110: Gurtverformung am Auflager**





**Abbildung A.111: Abgeknickter belasteter Gurt**



**Abbildung A.112: Langlochbildung in Profillängsrichtung**

Versuch 10

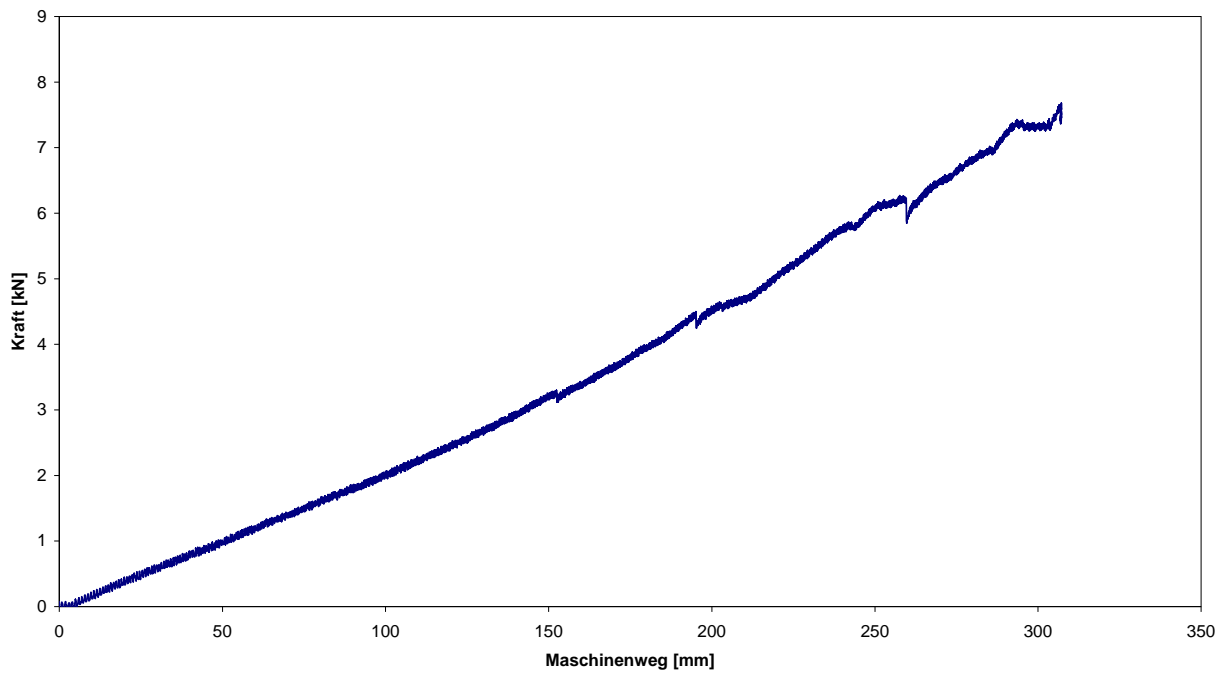


Abbildung A.113: Kraft-Maschinenweg-Diagramm Versuch 10

Versuch 10

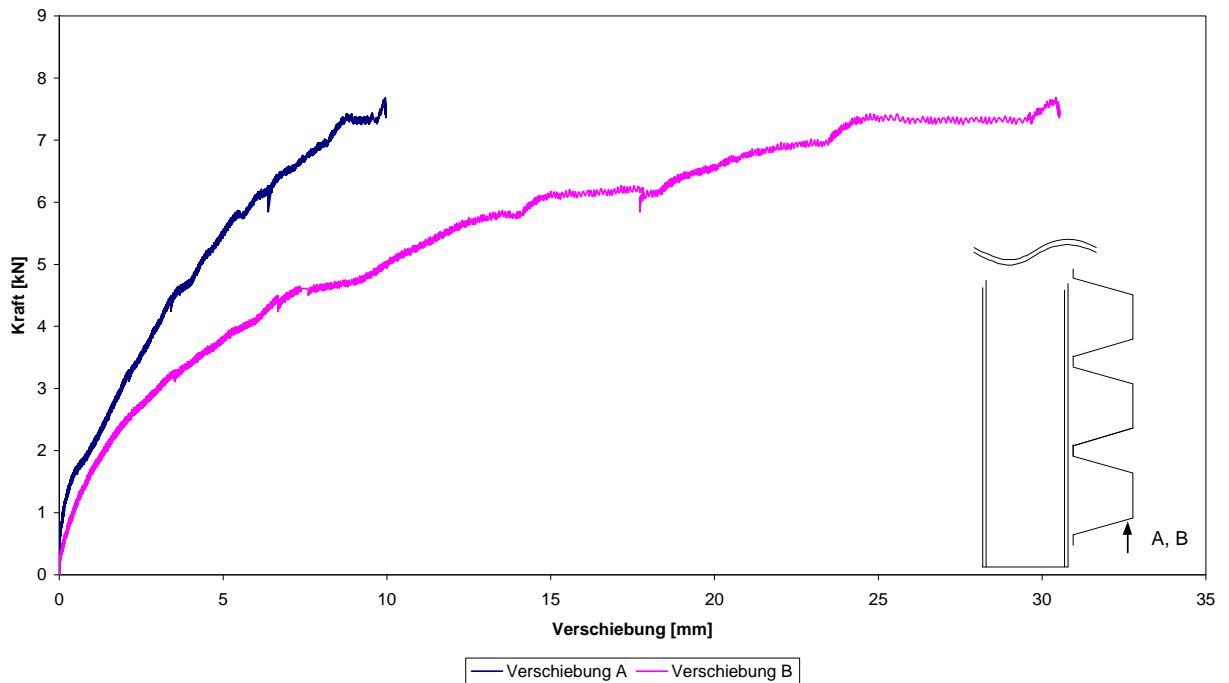


Abbildung A.114: Kraft-Verschiebungs-Diagramm

Versuch 10

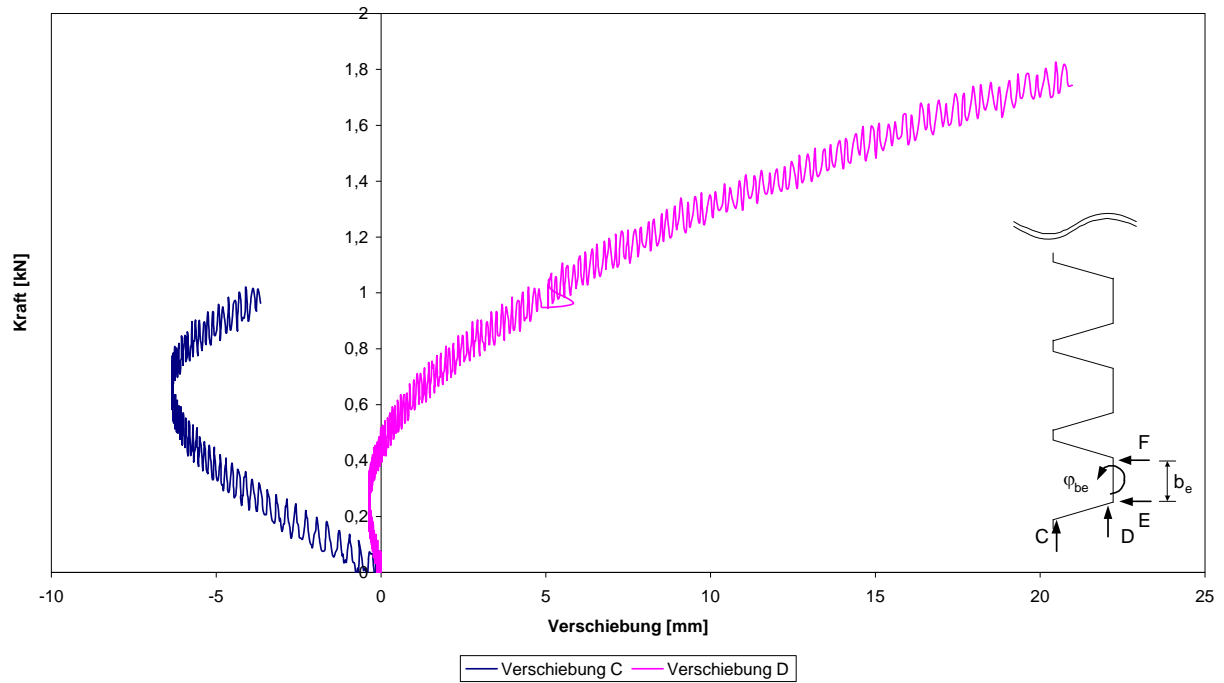


Abbildung A.115: Kraft-Verschiebungs-Diagramm

Versuch 10

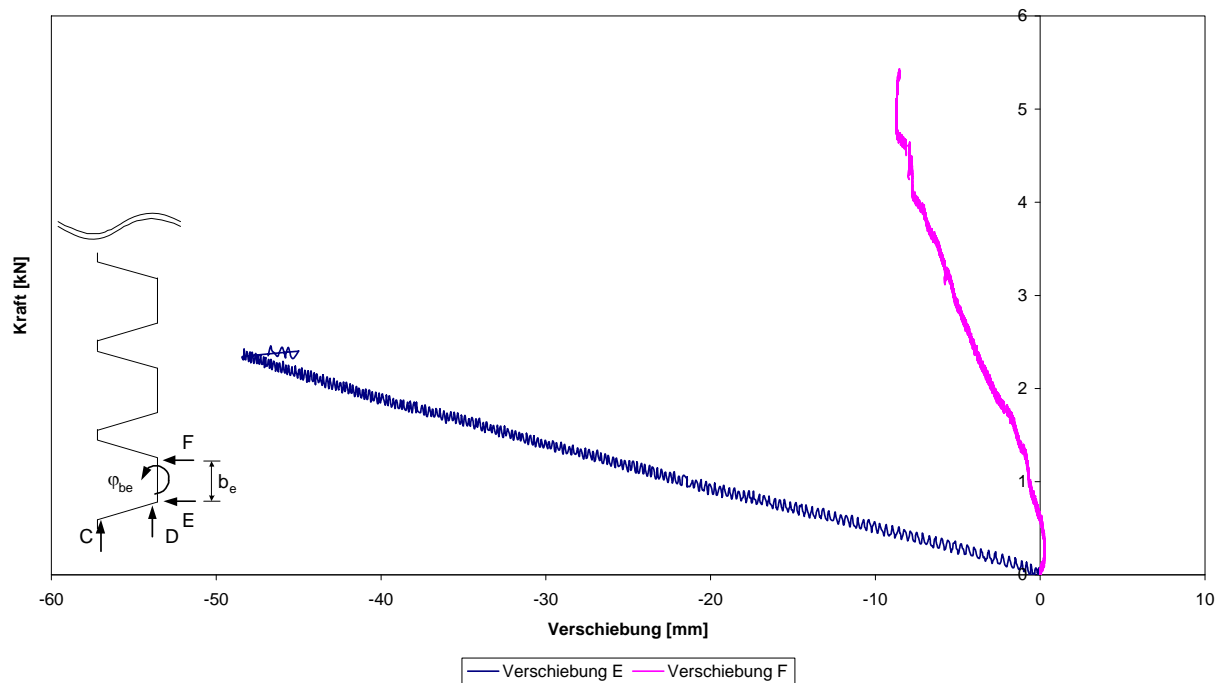
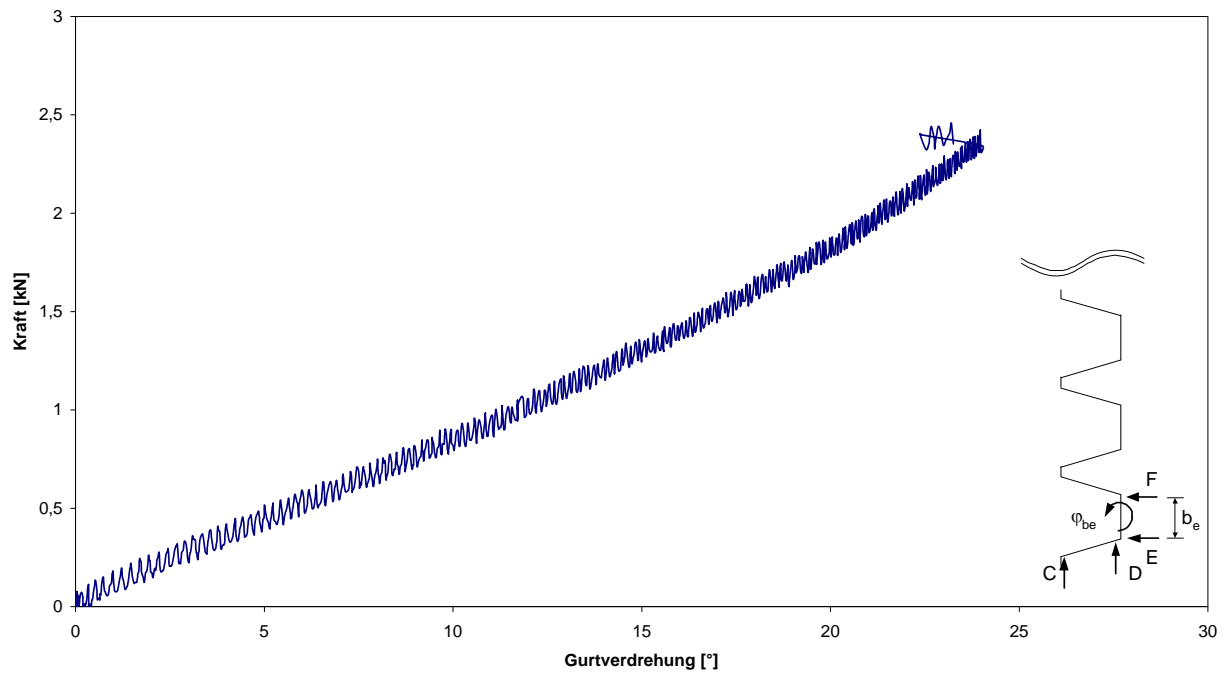


Abbildung A.116: Kraft-Verschiebungs-Diagramm

**Versuch 10**



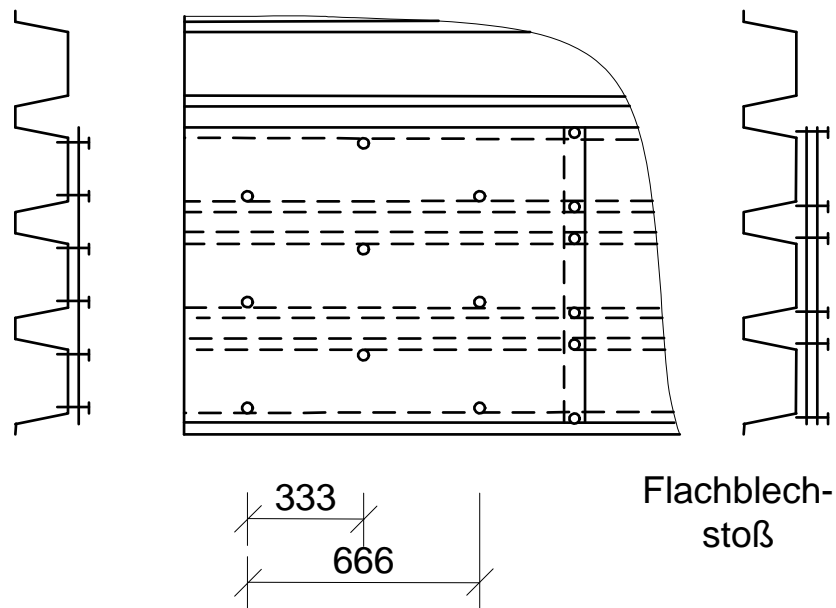
**Abbildung A.117: Kraft-Gurtverdrechungs-Diagramm**

**A.11 Versuch 11**

Versuch	Profil	Blechdicke	Stützweite	Hebelarm	Belastung
		[mm]	[m]	[mm]	
11	85/280	1,00	6,0	200	DS

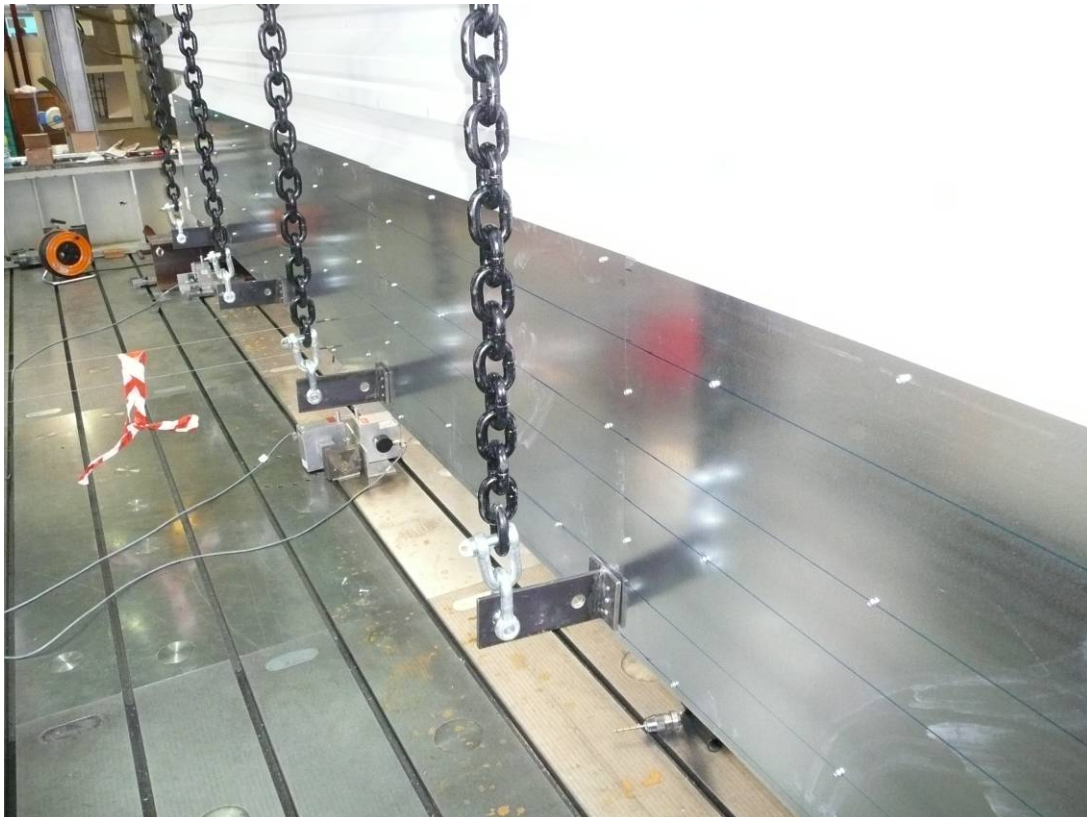
**Tabelle A.11: Versuchsparameter**

Im Versuch 10 wurde der belastete Obergurt über eine Flachblechtafel (Nennblechdicke 1,00 mm) mit den beiden benachbarten Obergurten gekoppelt (Abbildung A.105).



**Abbildung A.118: Befestigung des Flachblechs und Stoßbereich**

Der Versuch wurde nach Erreichen einer übermäßigen Gurtverformung abgebrochen.



**Abbildung A.119: Versuchsaufbau**





**Abbildung A.120: Gurtverdrehung**

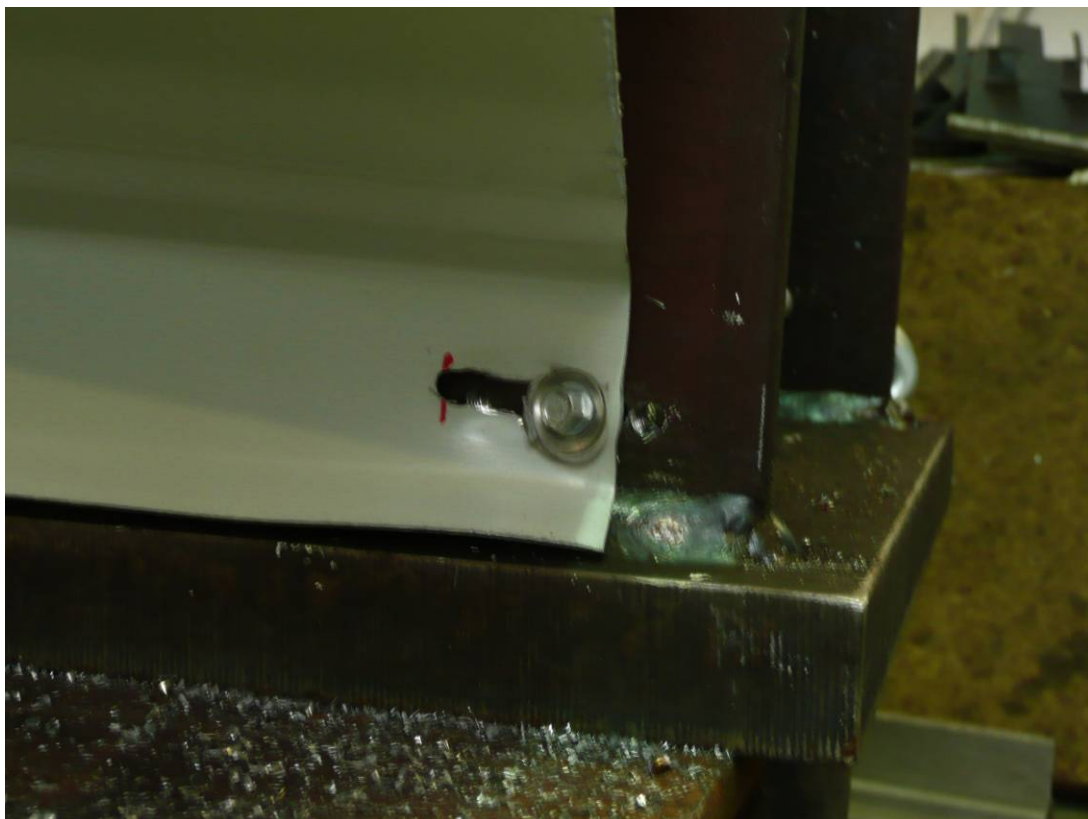


**Abbildung A.121: Gurtverdrehung**





**Abbildung A.122: Versagen durch Herausziehen der Schrauben an der Lasteinleitung**

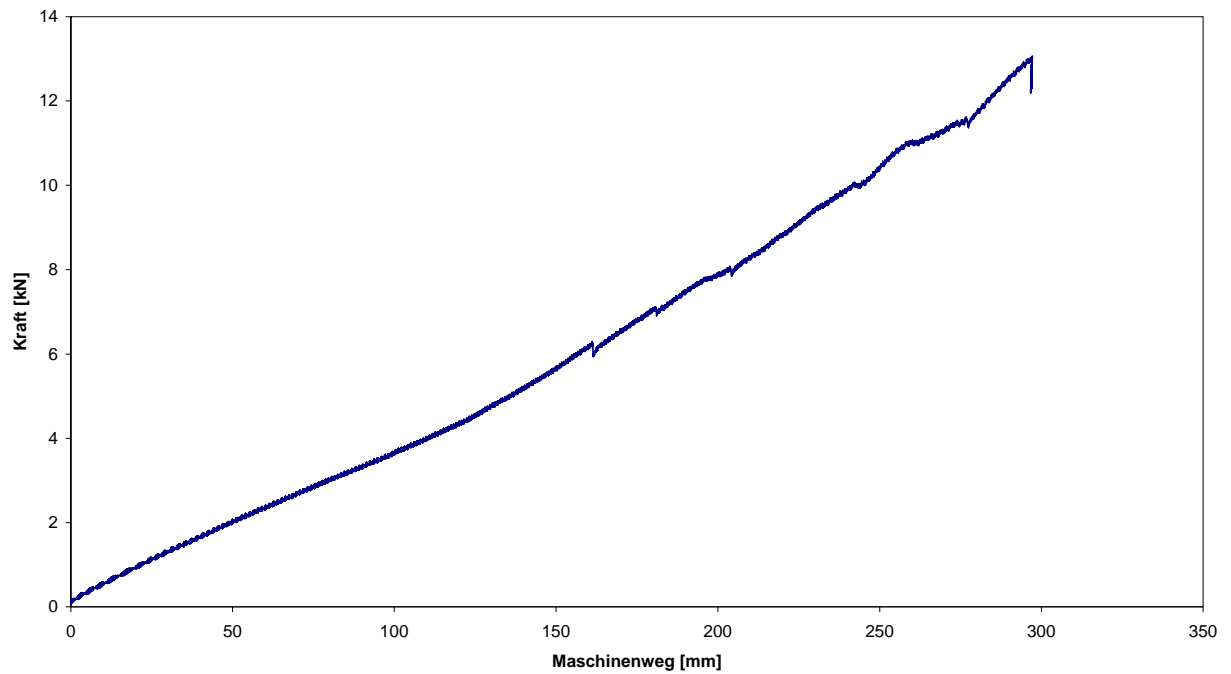


**Abbildung A.123: Langlochbildung in Profillängsrichtung**



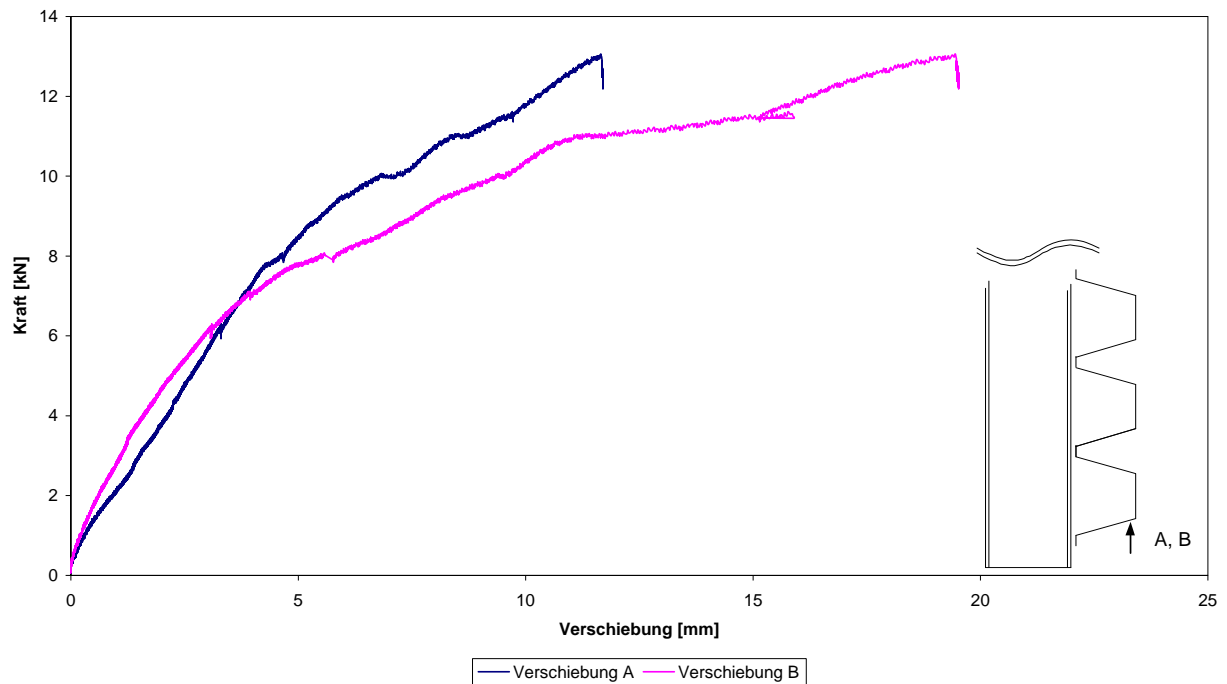
**Abbildung A.124: Abgeknickter Gurt**

**Versuch 11**



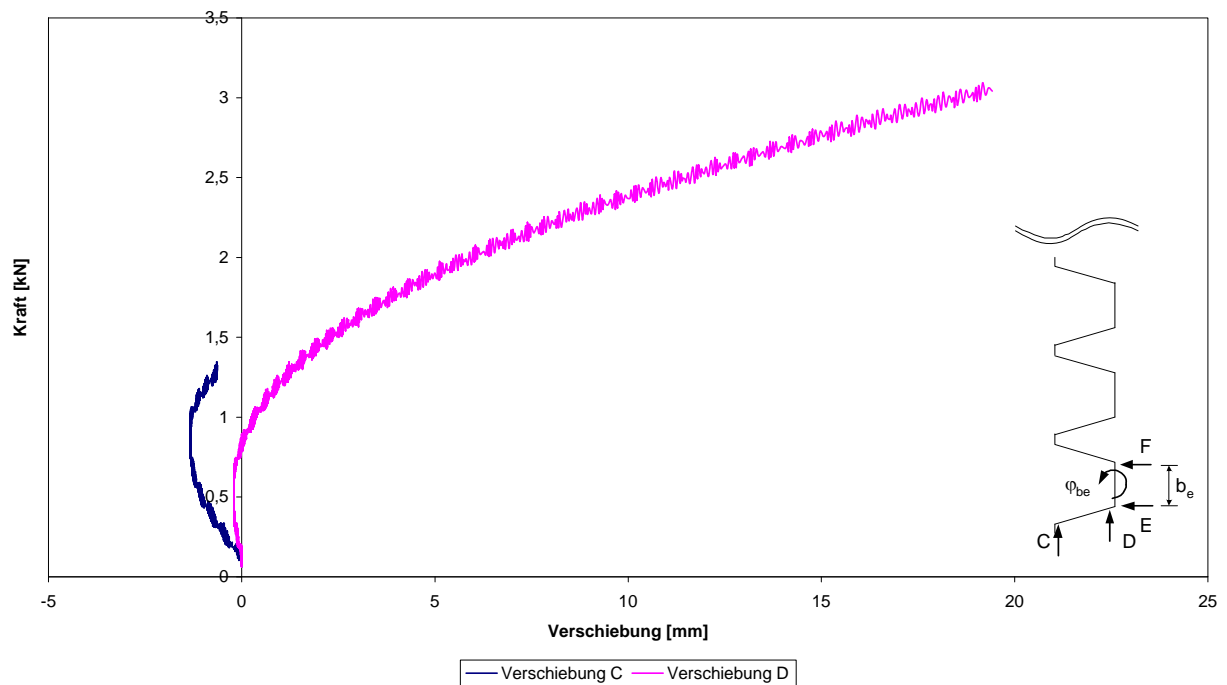
**Abbildung A.125: Kraft-Maschinenweg-Diagramm Versuch 11**

**Versuch 11**



**Abbildung A.126: Kraft-Verschiebungs-Diagramm**

**Versuch 11**



**Abbildung A.127: Kraft-Verschiebungs-Diagramm**

Versuch 11

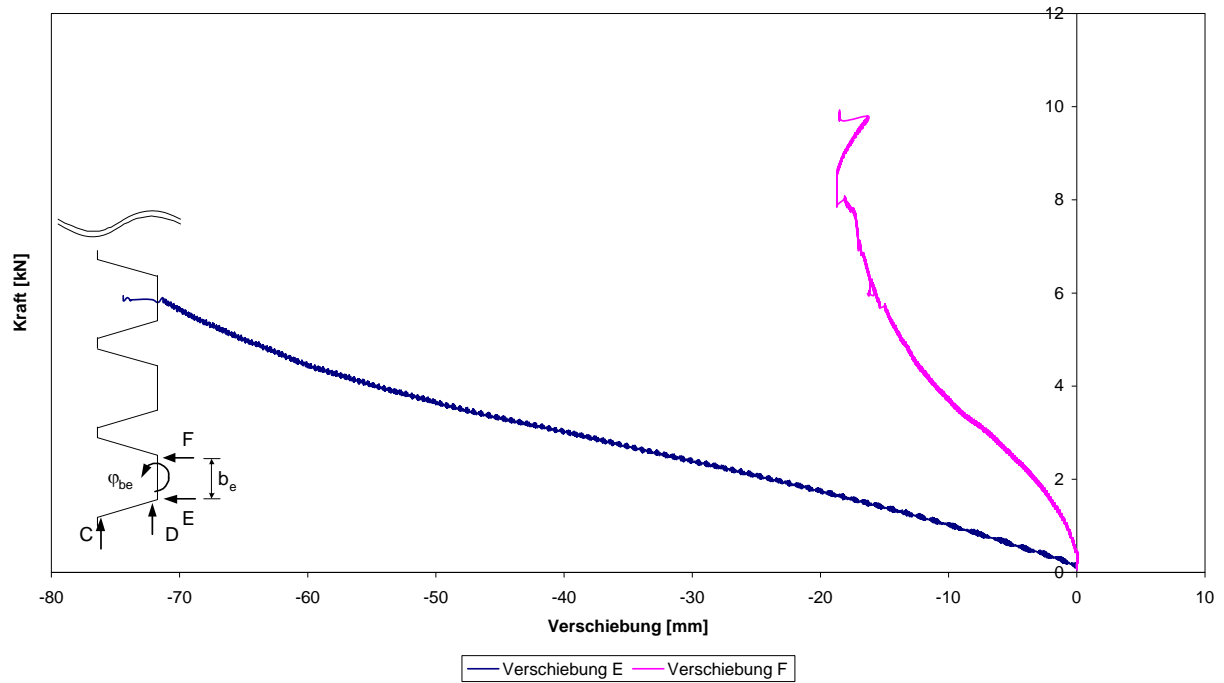


Abbildung A.128: Kraft-Verschiebungs-Diagramm

Versuch 11

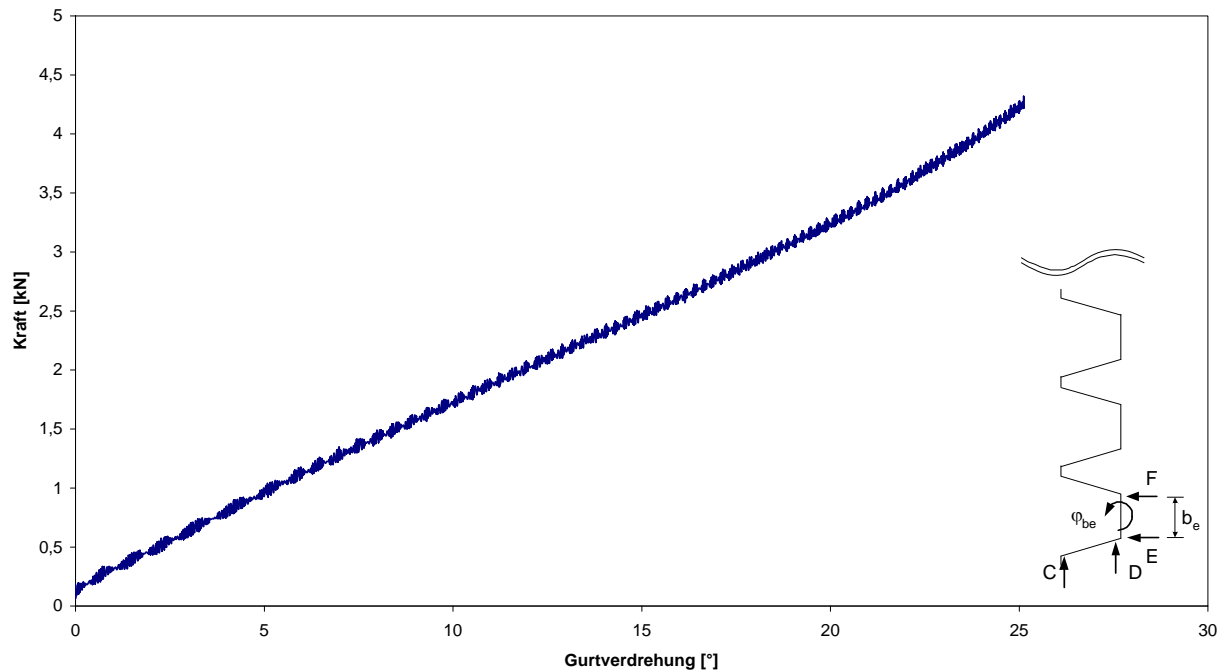


Abbildung A.129: Kraft-Gurtverdrehungs-Diagramm

## A.12 Versuch 12

Versuch	Profil	Blechdicke	Stützweite	Hebelarm	Belastung
		[mm]	[m]	[mm]	
12	160/250	0,75	6,0	60	DS

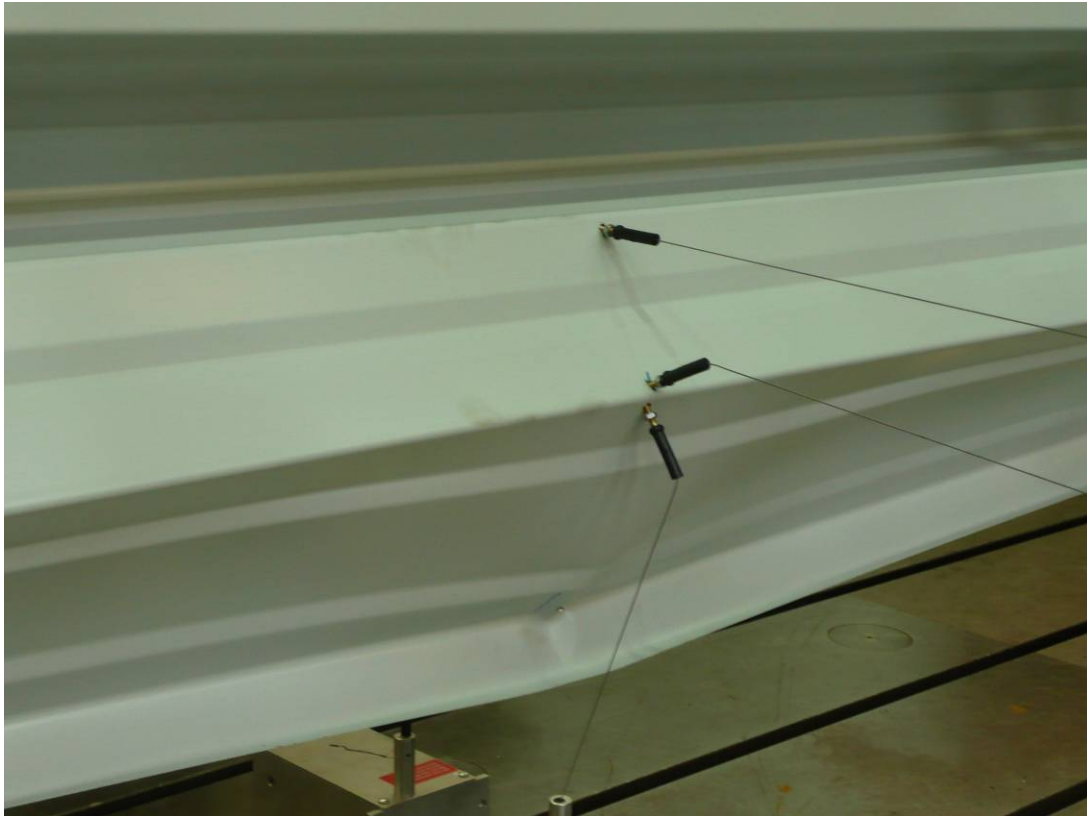
**Tabelle A.12: Versuchsparameter**

Das Versagen trat im Bereich der Verbindungen des schmalen Gurtes mit der Unterkonstruktion durch Langlochbildung nach starker Gurtverdrehung ein.



**Abbildung A.130: Versuchsaufbau**





**Abbildung A.131: Beule im Übergangsbereich Gurt-Steg**

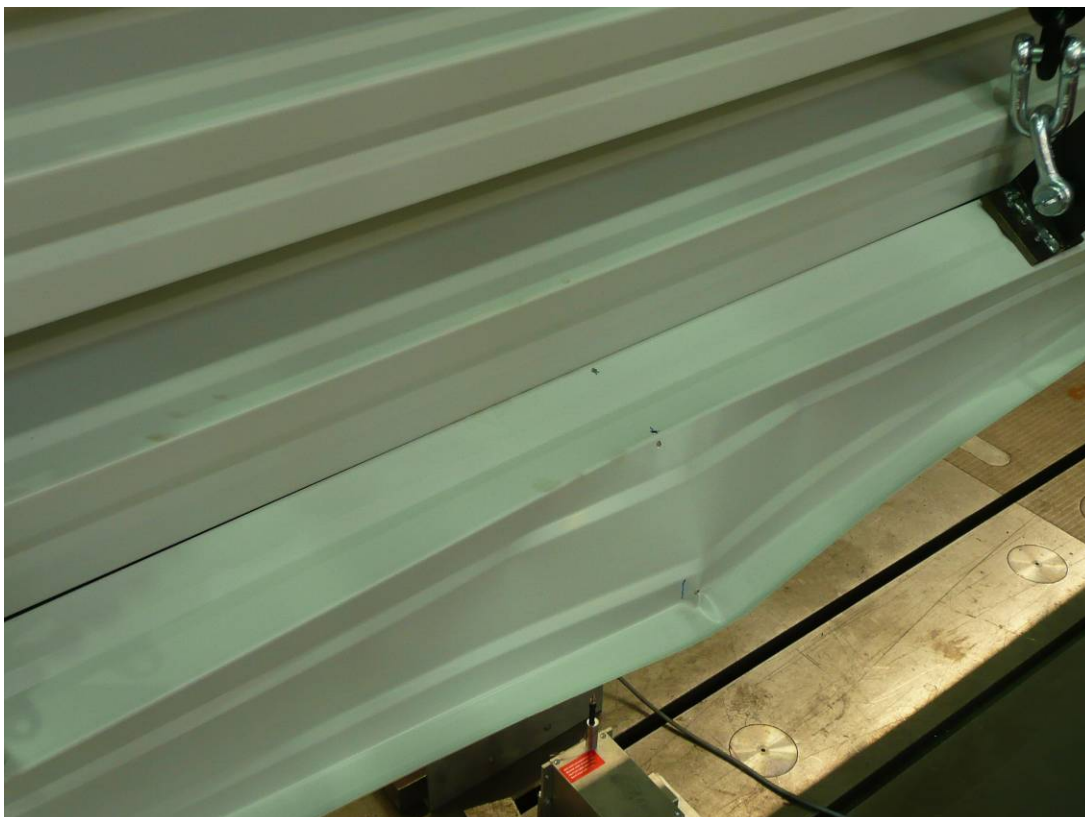


**Abbildung A.132: Gurtverdrehung**

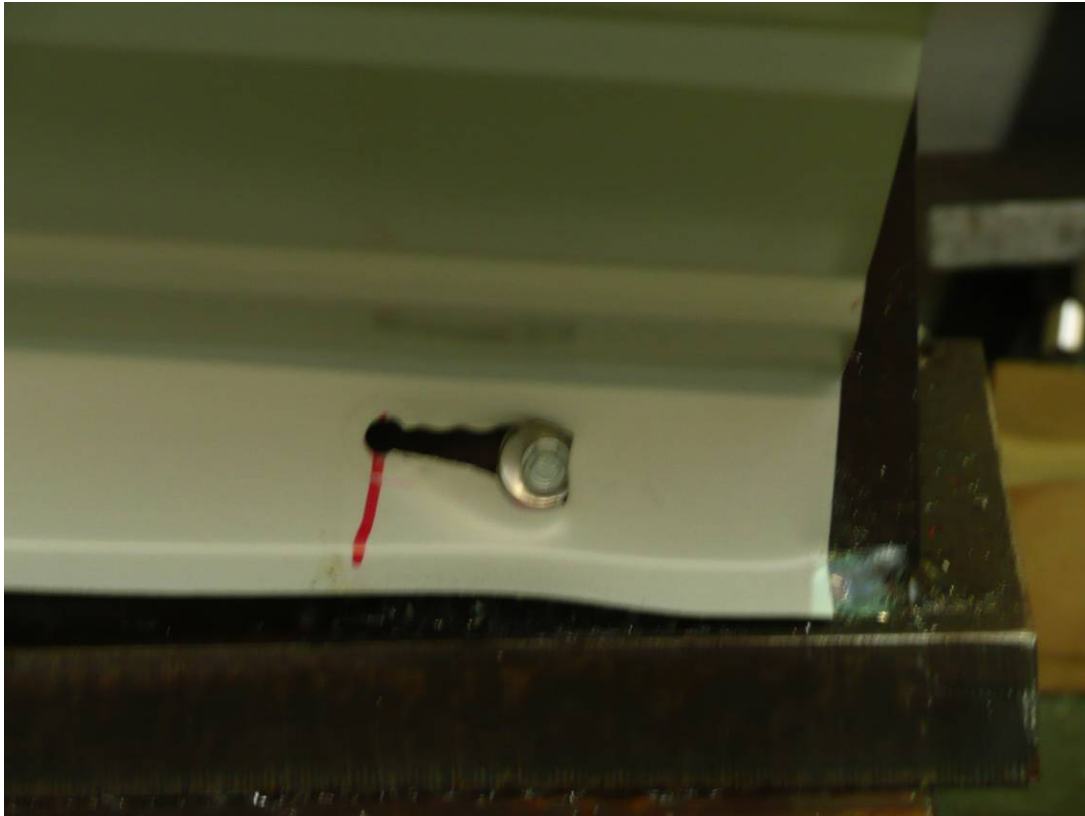




**Abbildung A.133: Gurtverdrehung**

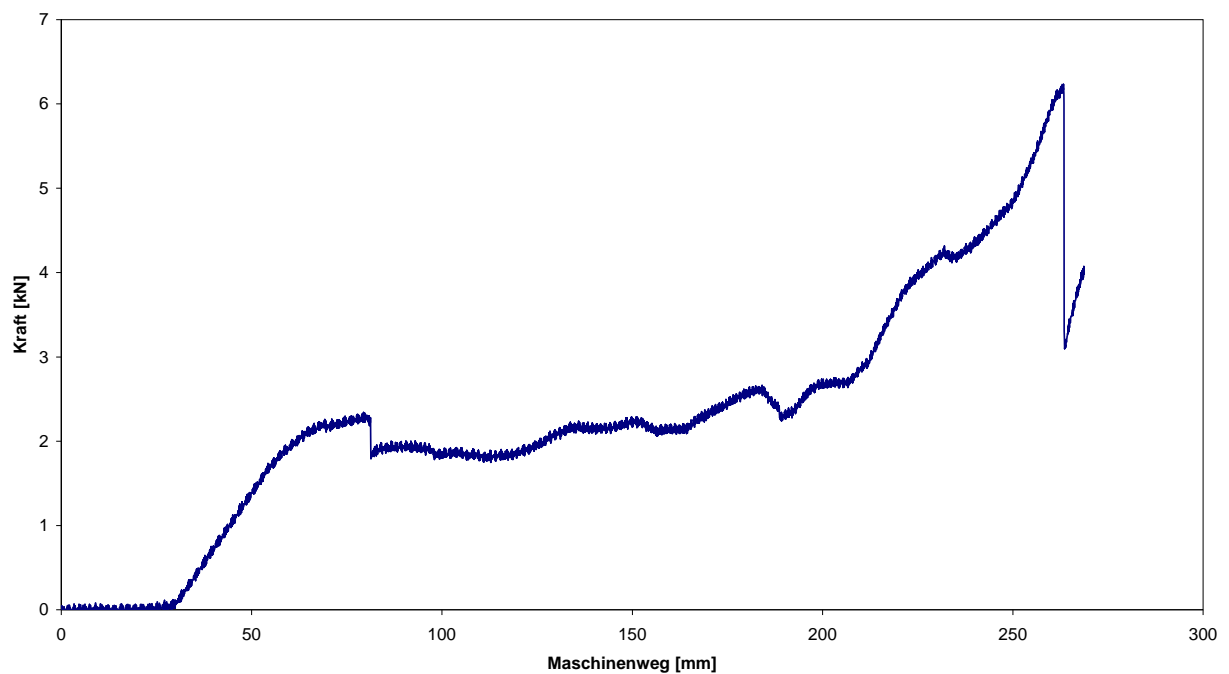


**Abbildung A.134: Gurtverdrehung**



**Abbildung A.135: Langlochbildung in Profillängsrichtung**

**Versuch 12**



**Abbildung A.136: Kraft-Maschinenweg-Diagramm Versuch 12**

Versuch 12

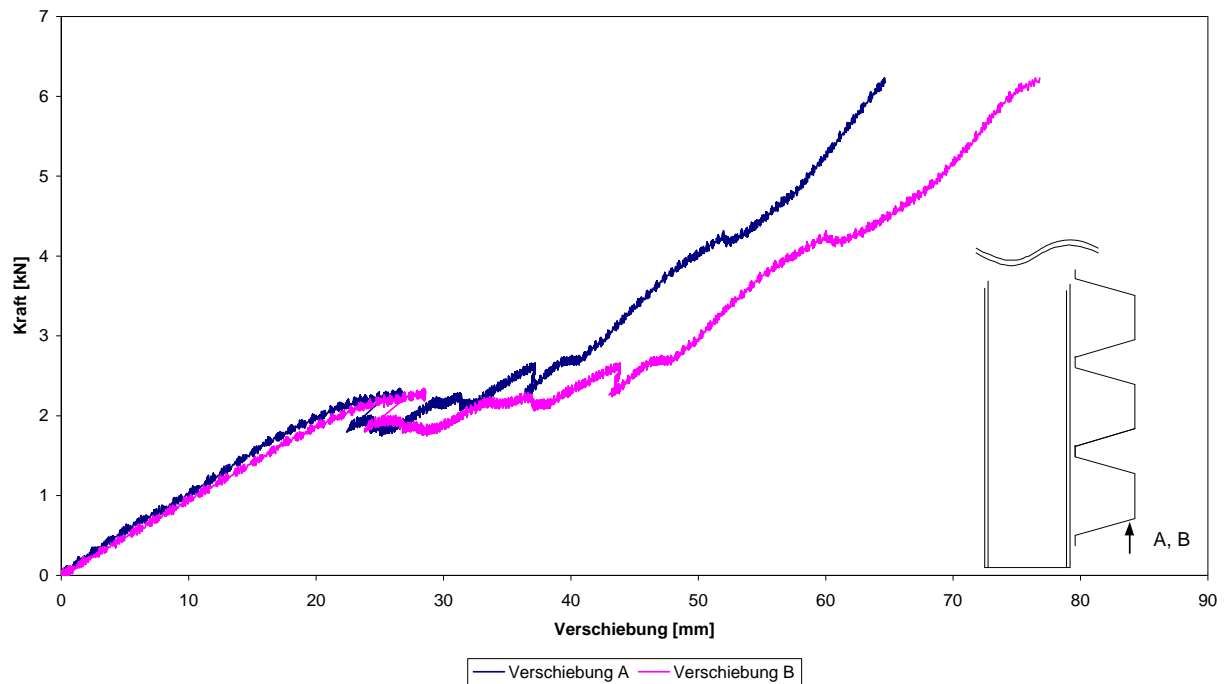


Abbildung A.137: Kraft-Verschiebungs-Diagramm

Versuch 12

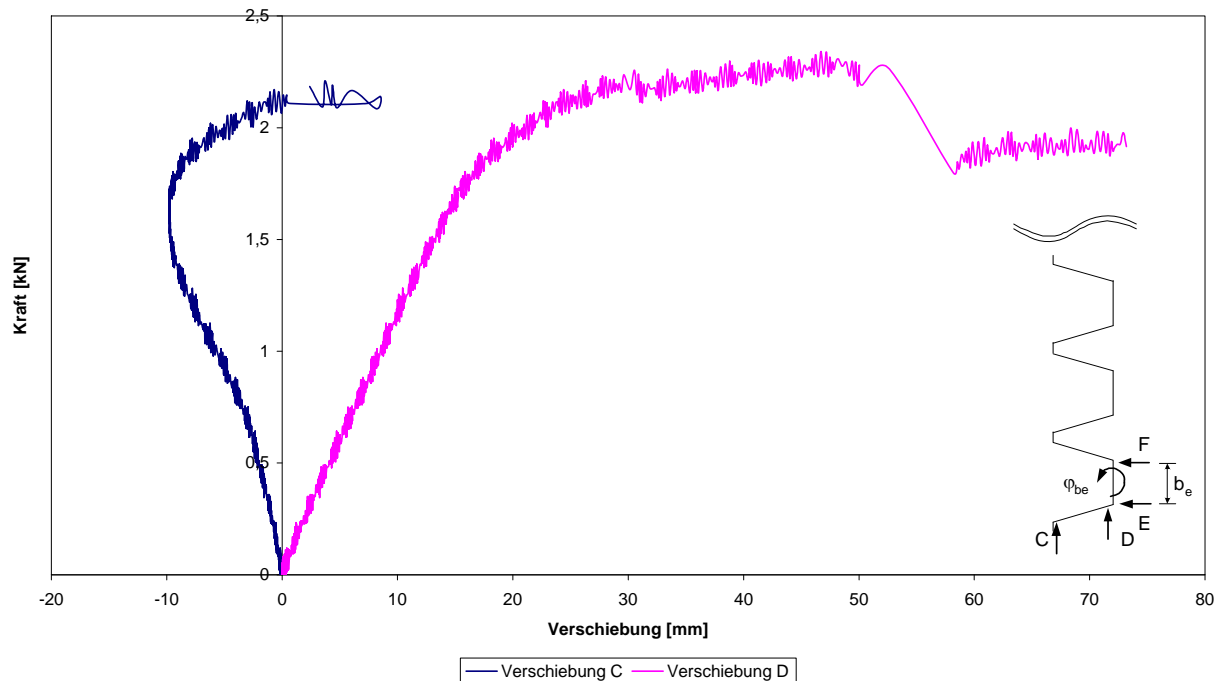


Abbildung A.138: Kraft-Verschiebungs-Diagramm

Versuch 12

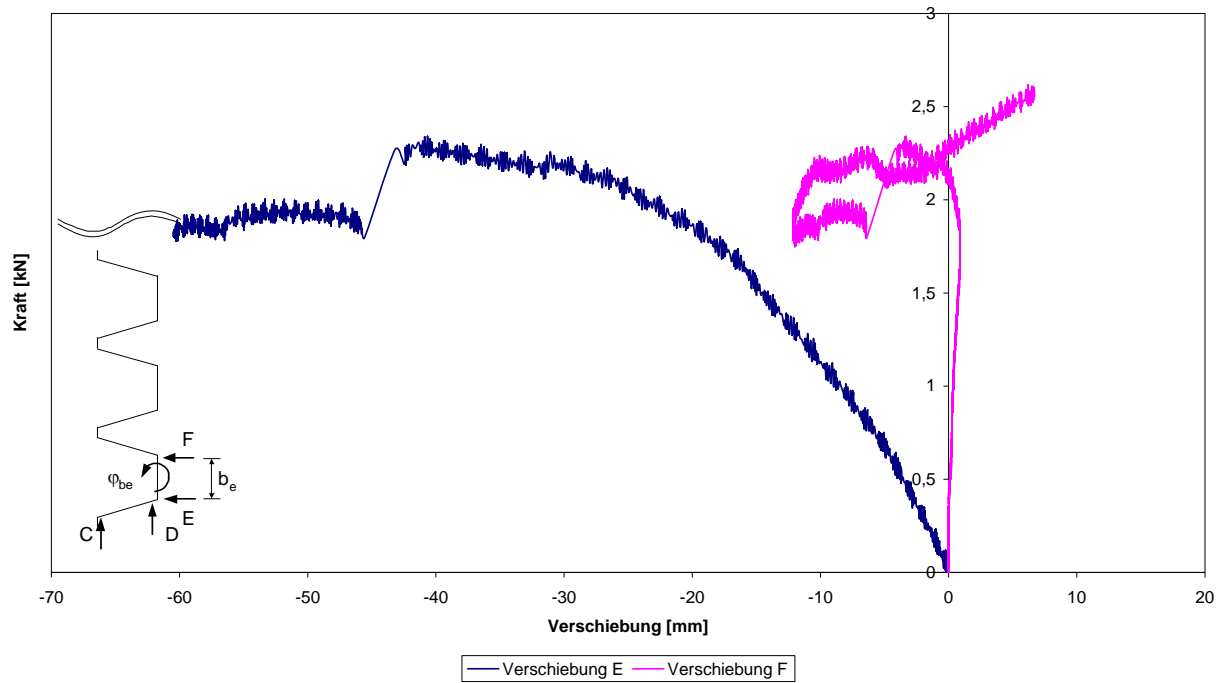


Abbildung A.139: Kraft-Verschiebungs-Diagramm

Versuch 12

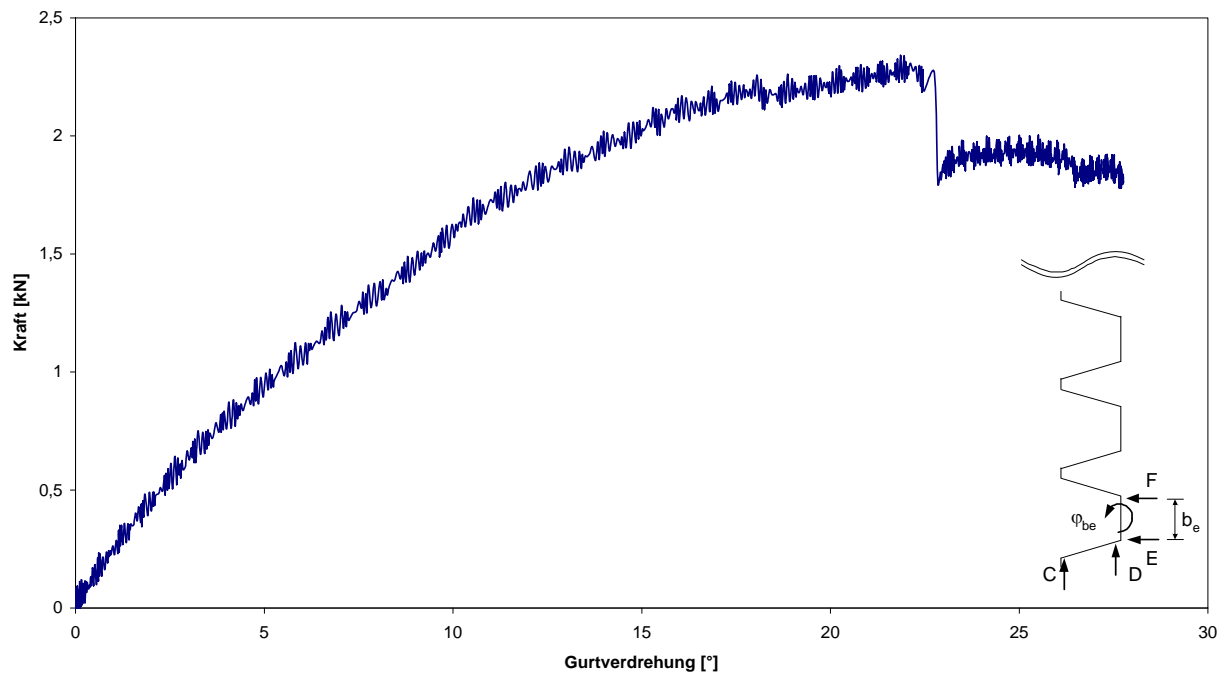


Abbildung A.140: Kraft-Gurtverdrehungs-Diagramm

### A.13 Versuch 13

Versuch	Profil	Blechdicke	Stützweite	Hebelarm	Belastung
		[mm]	[m]	[mm]	
13	160/250	0,75	6,0	60	DS

**Tabelle A.13: Versuchsparameter**

Das Versagen trat im Bereich der Verbindungen des schmalen Gurtes mit der Unterkonstruktion durch Langlochbildung ein. In Feldmitte war es zuvor zu einem Knicken des freien schmalen Gurtes gekommen.



**Abbildung A.141: Kraft-Gurtverdrehungs-Diagramm**





**Abbildung A.142: Gurtverdrehung**



**Abbildung A.143: Gurtverdrehung**





**Abbildung A.144: Gurtverdrehung**

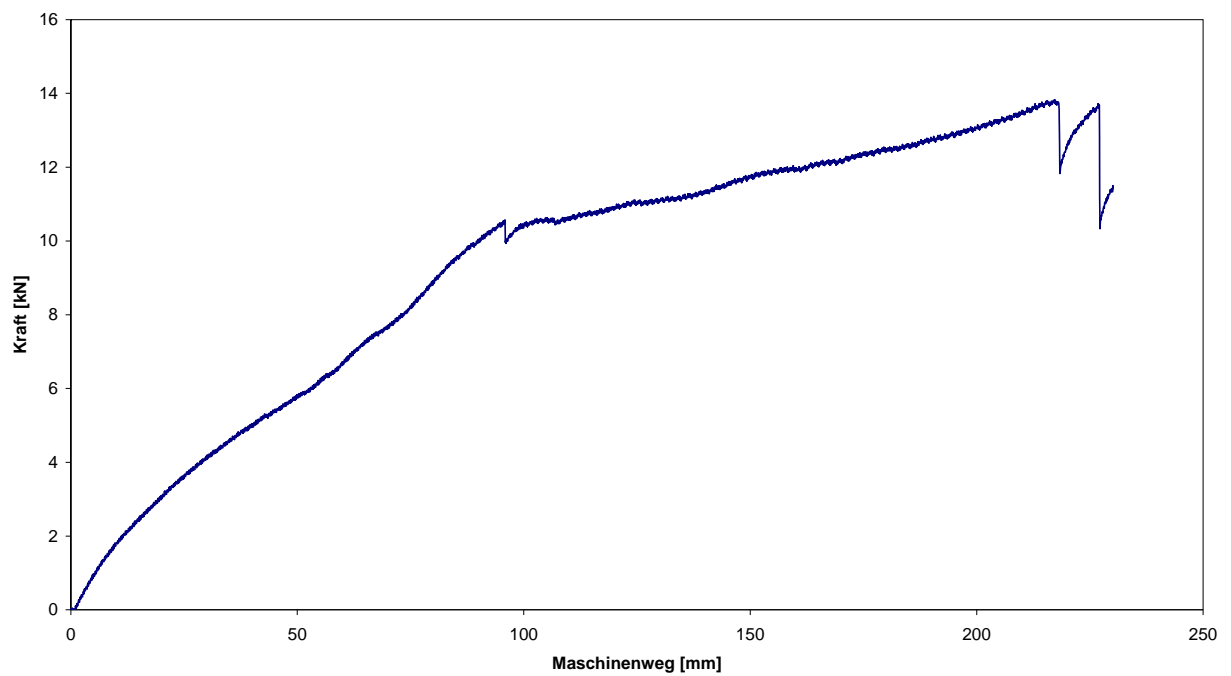


**Abbildung A.145: Knick in Feldmitte**



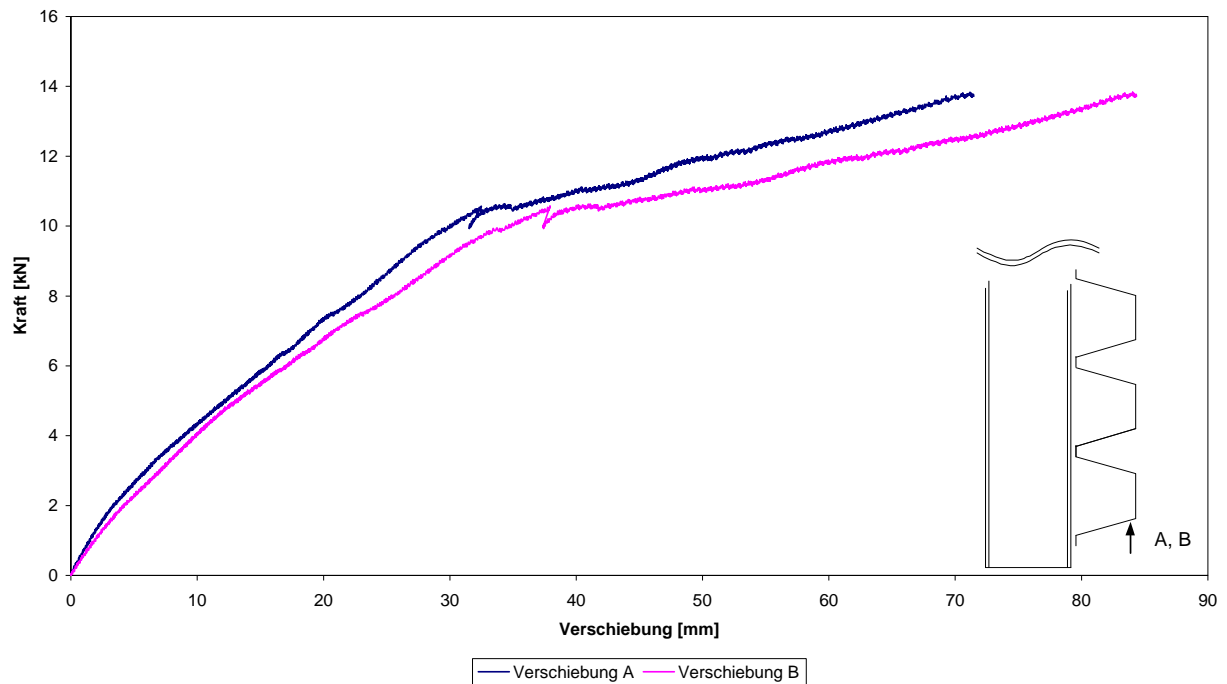
**Abbildung A.146: Langlochbildung**

**Versuch 13**



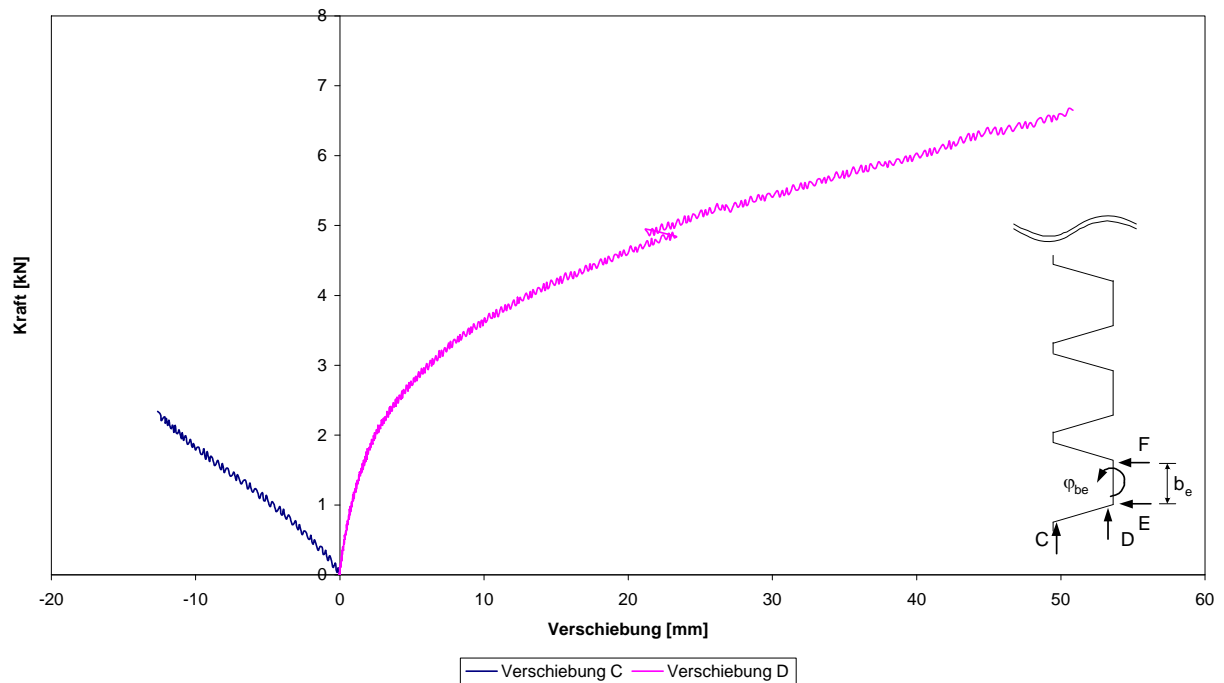
**Abbildung A.147: Kraft-Maschinenweg-Diagramm Versuch 13**

**Versuch 13**



**Abbildung A.148: Kraft-Verschiebungs-Diagramm**

**Versuch 13**



**Abbildung A.149: Kraft-Verschiebungs-Diagramm**

Versuch 13

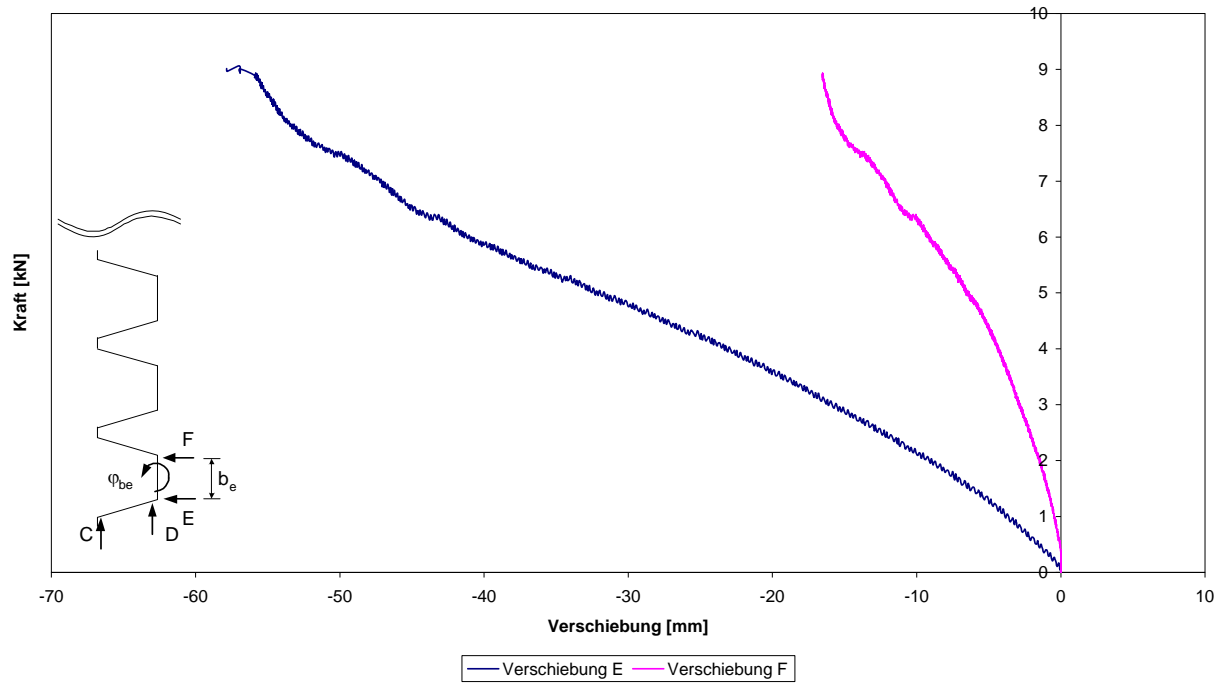


Abbildung A.150: Kraft-Verschiebungs-Diagramm

Versuch 13

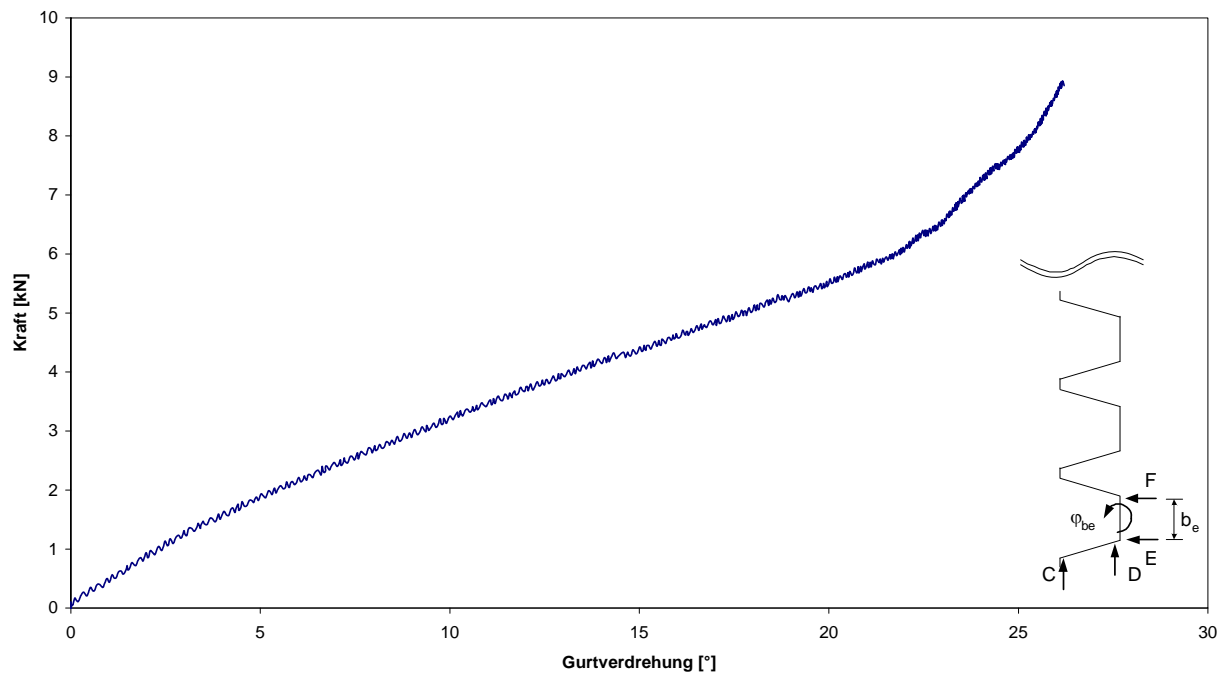


Abbildung A.151: Kraft-Gurtverdrehungs-Diagramm

#### A.14 Versuch 14

Versuch	Profil	Blechdicke	Stützweite	Hebelarm	Belastung
		[mm]	[m]	[mm]	
14	160/250	0,75	6,0	60	WA

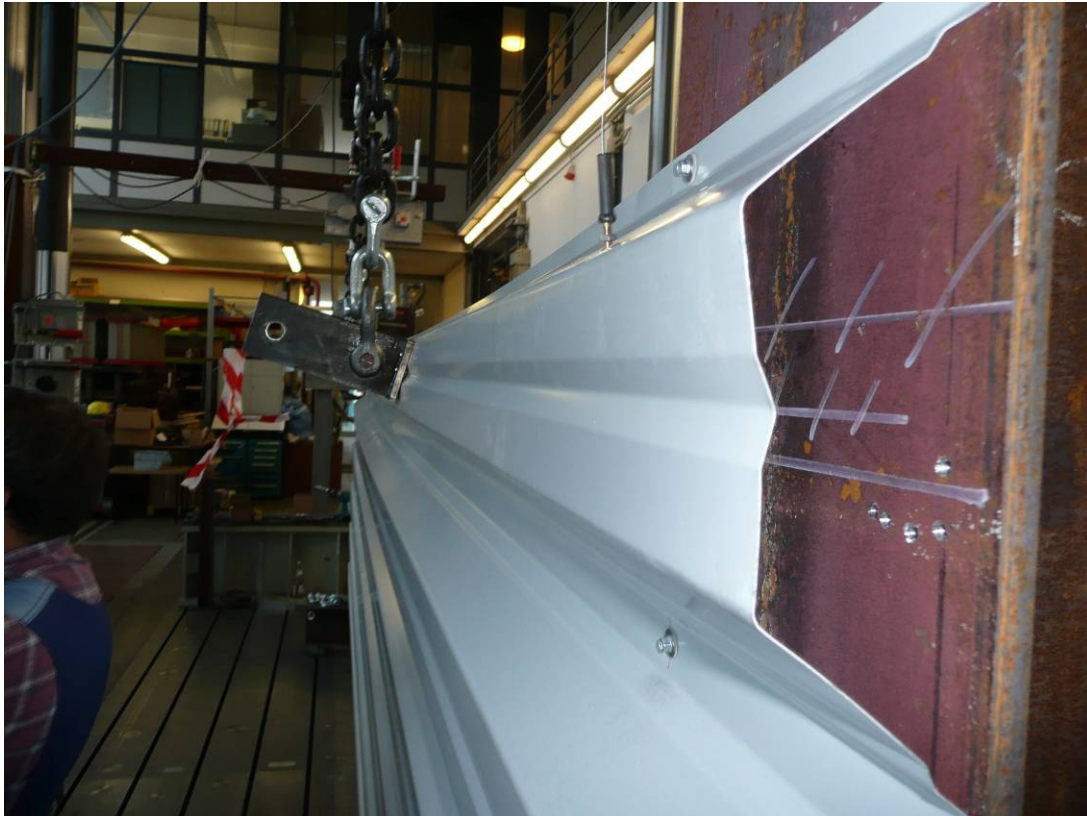
**Tabelle A.14: Versuchsparameter**

Das Versagen trat im Bereich der Lasteinleitung durch Herausziehen aus der Schrauben aus dem Obergurt ein. In Feldmitte war es zuvor zu einer Beule im Bereich des schmalen Gurtes gekommen.



**Abbildung A.152: Versuchsaufbau**





**Abbildung A.153: Profilverformung**



**Abbildung A.154: Beule im schmalen Gurt**





**Abbildung A.155: Stegkrüppeln**

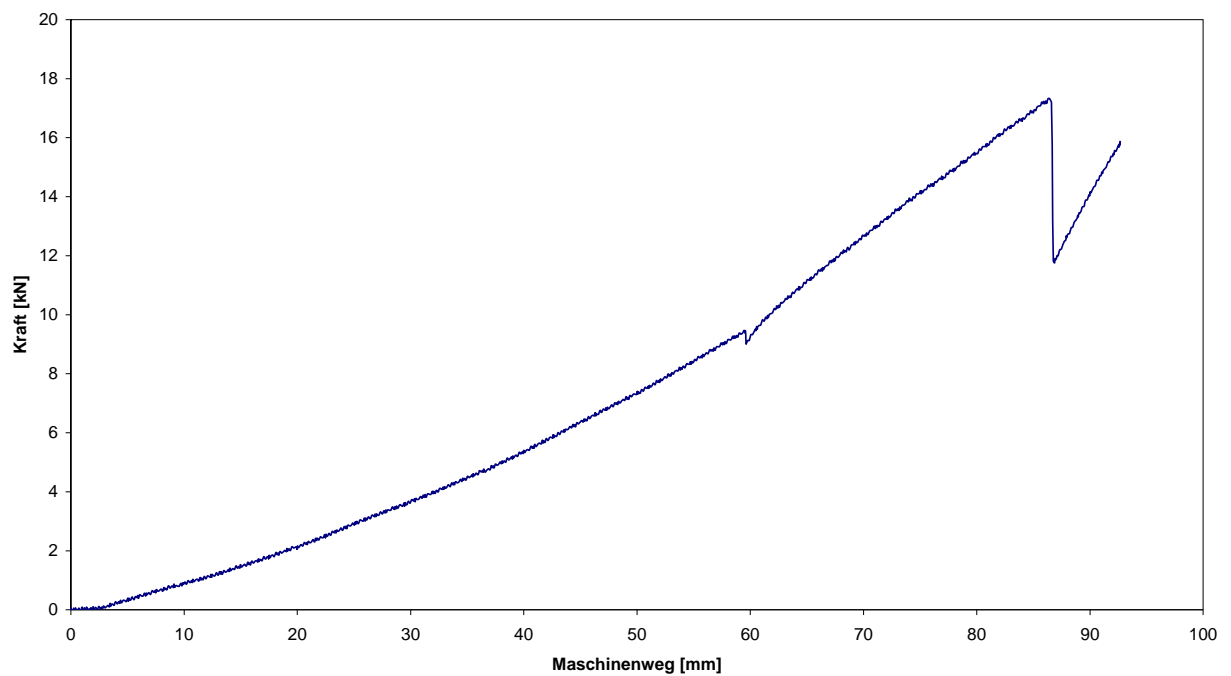


**Abbildung A.156: Profilverformung**



**Abbildung A.157: Versagen durch Herausziehen der Schrauben an der Lasteinleitung**

**Versuch 14**



**Abbildung A.158: Kraft-Maschinenweg-Diagramm Versuch 14**

Versuch 14

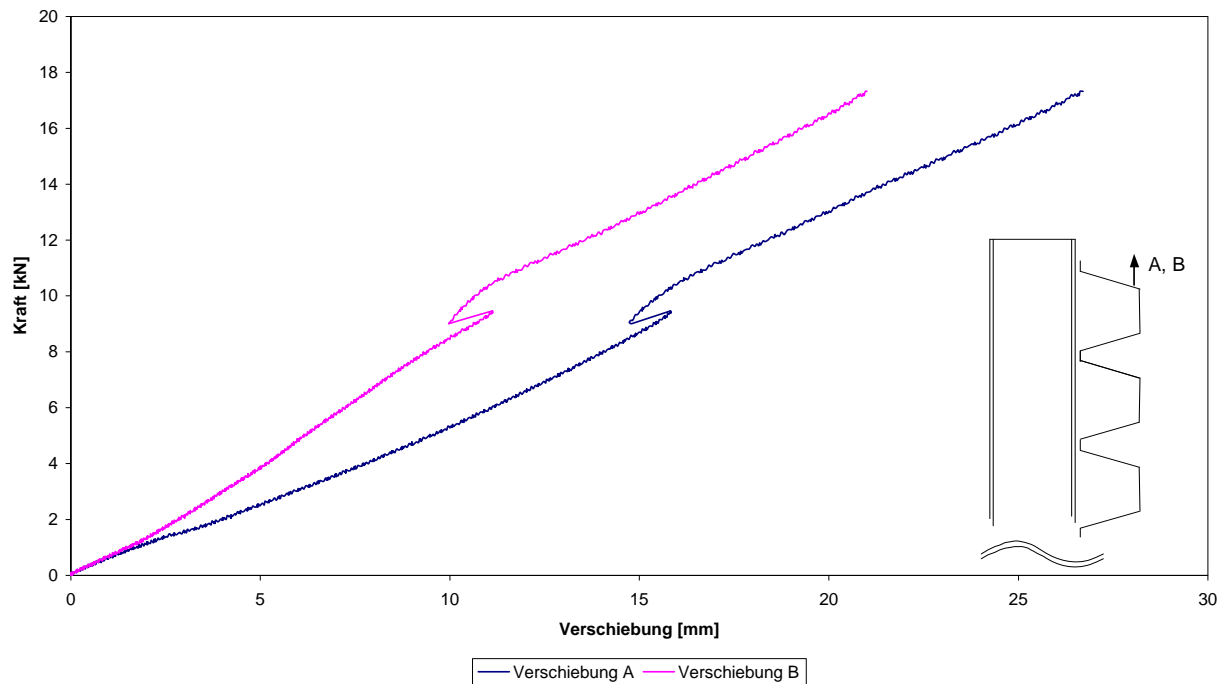


Abbildung A.159: Kraft-Verschiebungs-Diagramm

Versuch 14

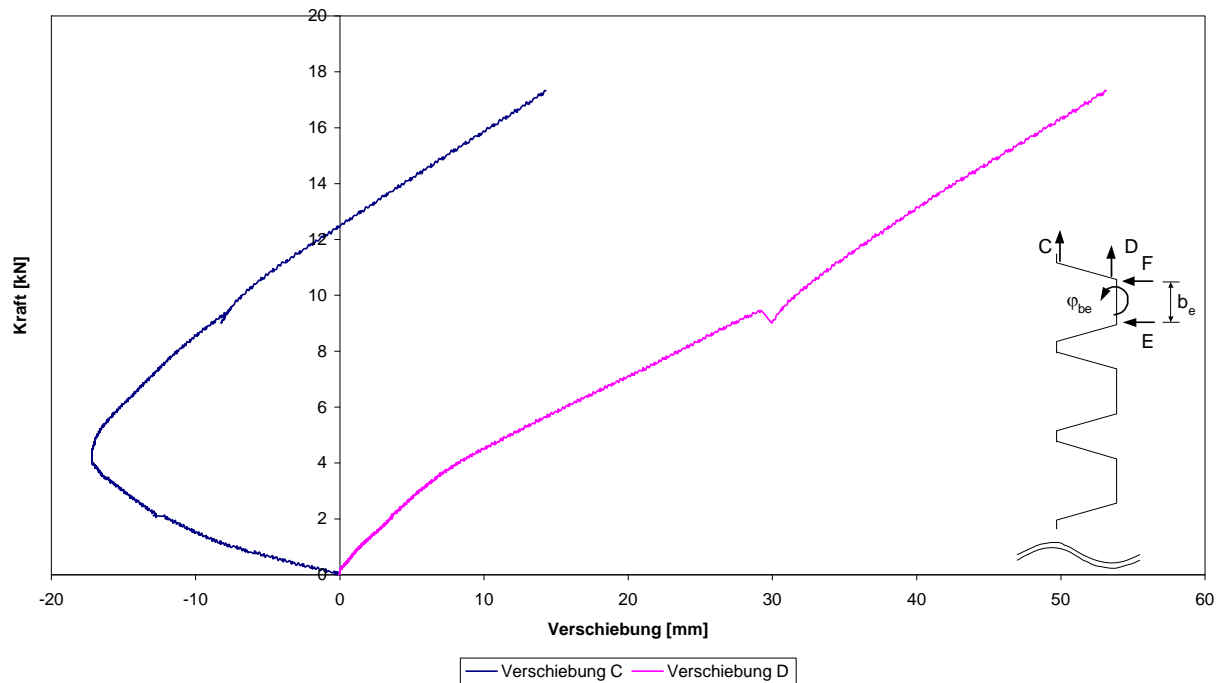


Abbildung A.160: Kraft-Verschiebungs-Diagramm

Versuch 14

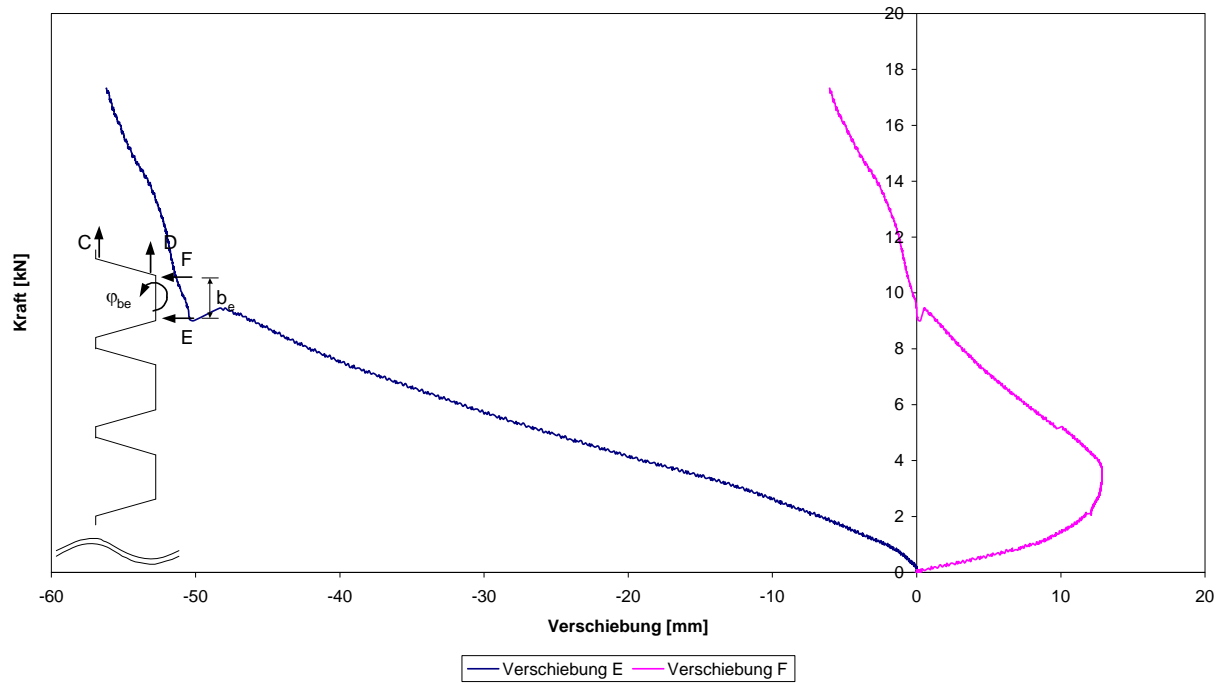


Abbildung A.161: Kraft-Verschiebungs-Diagramm

Versuch 14

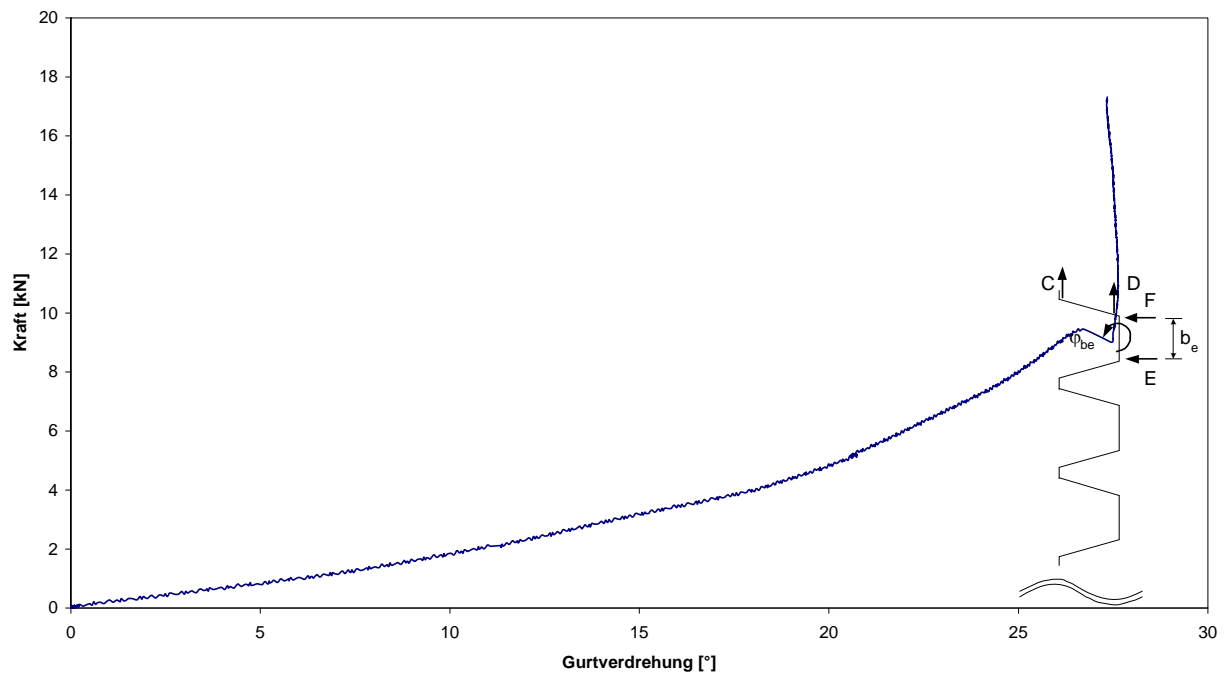


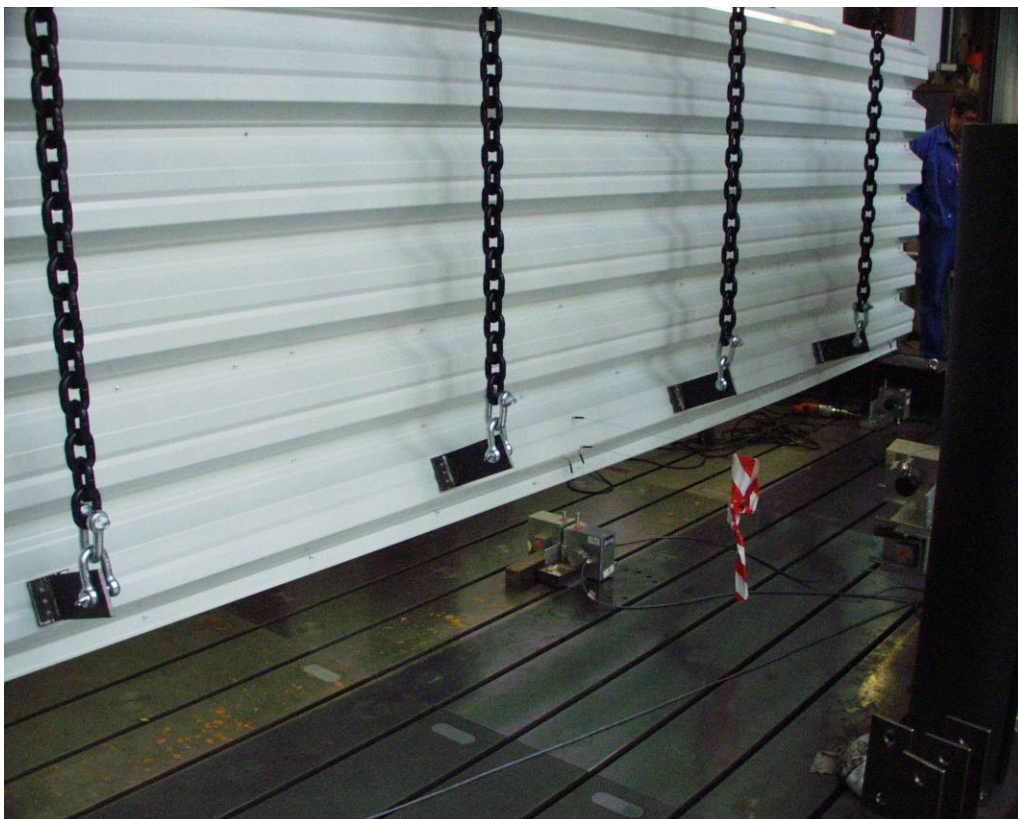
Abbildung A.162: Kraft-Gurtverdrehungs-Diagramm







**Abbildung A.164: Versuchsaufbau**



**Abbildung A.165: Profilverdrehung**





**Abbildung A.166: Verformung der Flachblechtafeln**



**Abbildung A.167: Knick im freien Untergurt**





**Abbildung A.168: Verformung der Flachblechtafeln am Auflager**

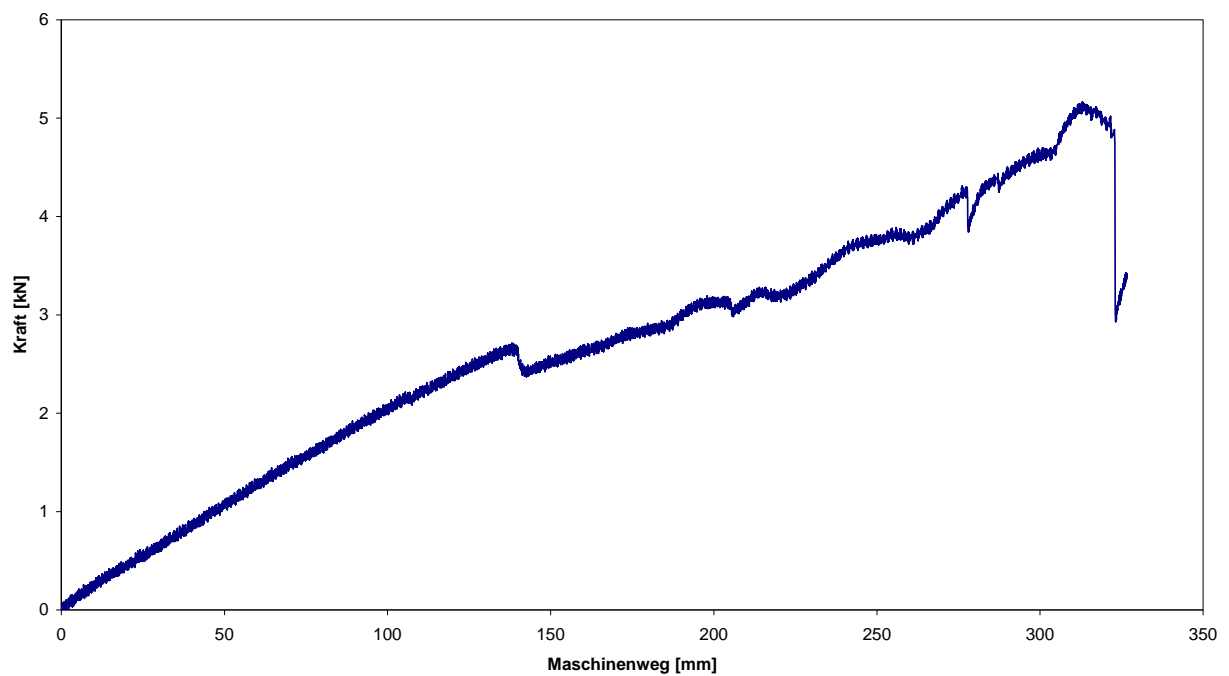


**Abbildung A.169: Versagen durch Langlochbildung**



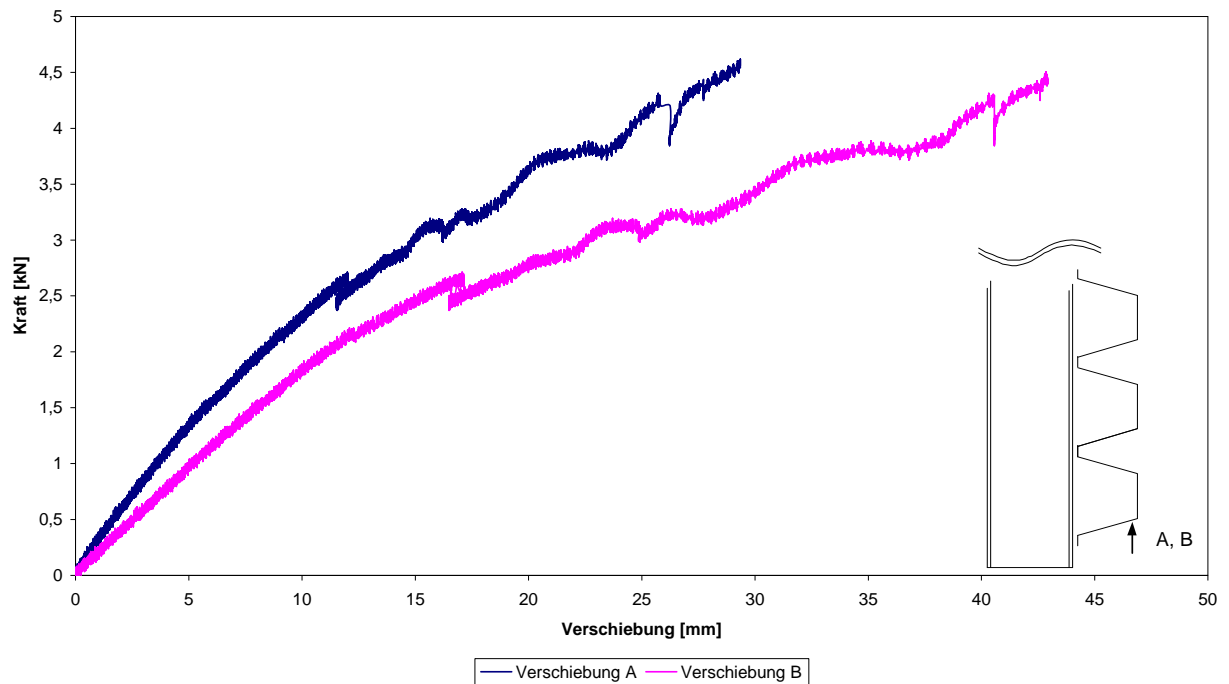
**Abbildung A.170: Langlochbildung**

**Versuch 15**



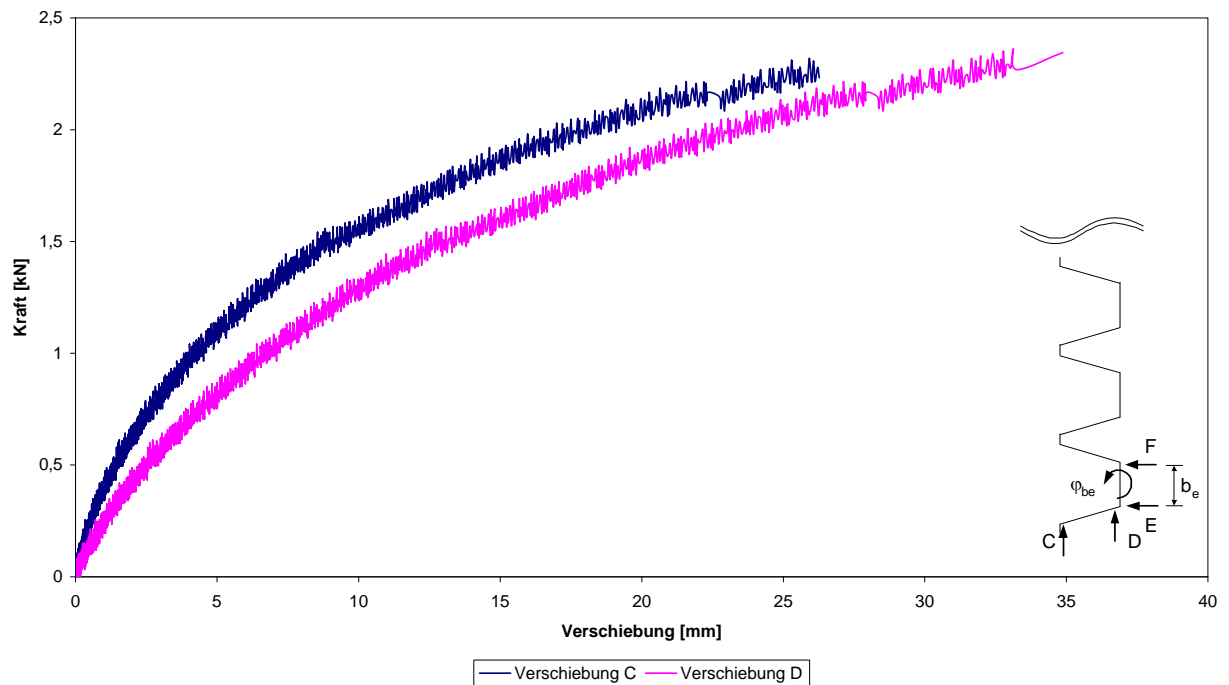
**Abbildung A.171: Kraft-Maschinenweg-Diagramm Versuch 15**

**Versuch 15**



**Abbildung A.172: Kraft-Verschiebungs-Diagramm**

**Versuch 15**



**Abbildung A.173: Kraft-Verschiebungs-Diagramm**

Versuch 15

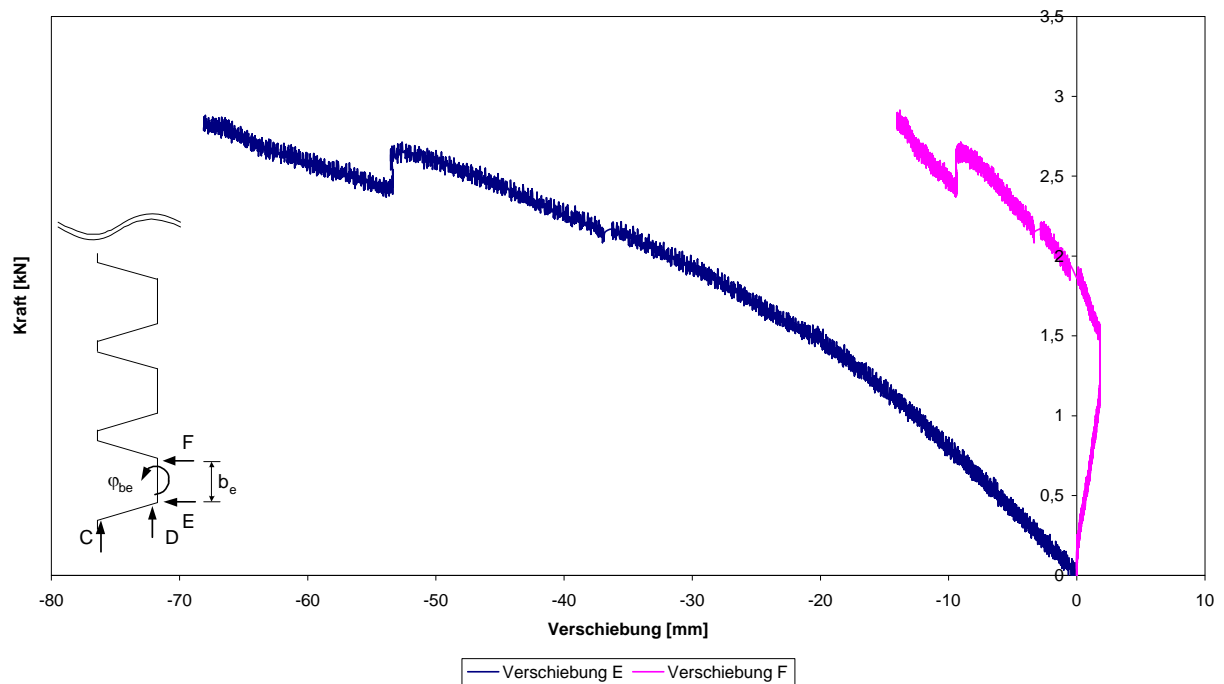


Abbildung A.174: Kraft-Verschiebungs-Diagramm

Versuch 15

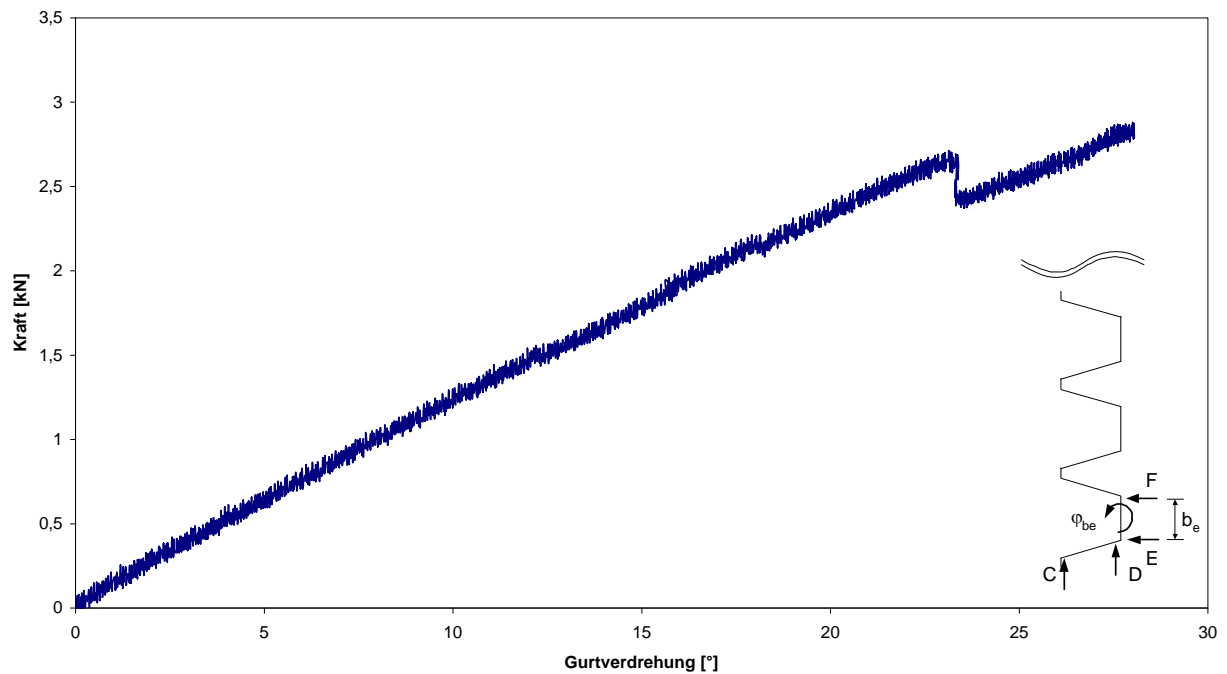


Abbildung A.175: Kraft-Gurtverdrehungs-Diagramm

### A.16 Werkstoffkennwerte

An Proben aus den Stahltrapezprofilen wurden Zugversuche nach DIN EN 10002-1 durchgeführt.

Probe	$t_{k1}$	$R_{eH}$	$R_{p0,2}$	$R_m$	$A_{80mm}$
	[mm]	[N/mm <sup>2</sup> ]	[N/mm <sup>2</sup> ]	[N/mm <sup>2</sup> ]	[%]
85-75-1	0,680	417	394	440	20,7
85-75-2	0,686	446	410	444	20,3
85-75-3	0,694	439	404	437	19,3
85-100-1	0,943	411	390	448	19,1
85-100-2	0,940	412	390	450	19,7
85-100-3	0,941	417	394	450	19,8
85-150-1	1,437	-	329	446	25,5
85-150-2	1,444	331	325	445	25,6
85-150-3	1,441	-	328	445	25,5
165-75-1	0,680	421	395	441	20,2
165-75-2	0,687	414	394	437	19,4
165-75-3	0,684	414	395	439	19,5

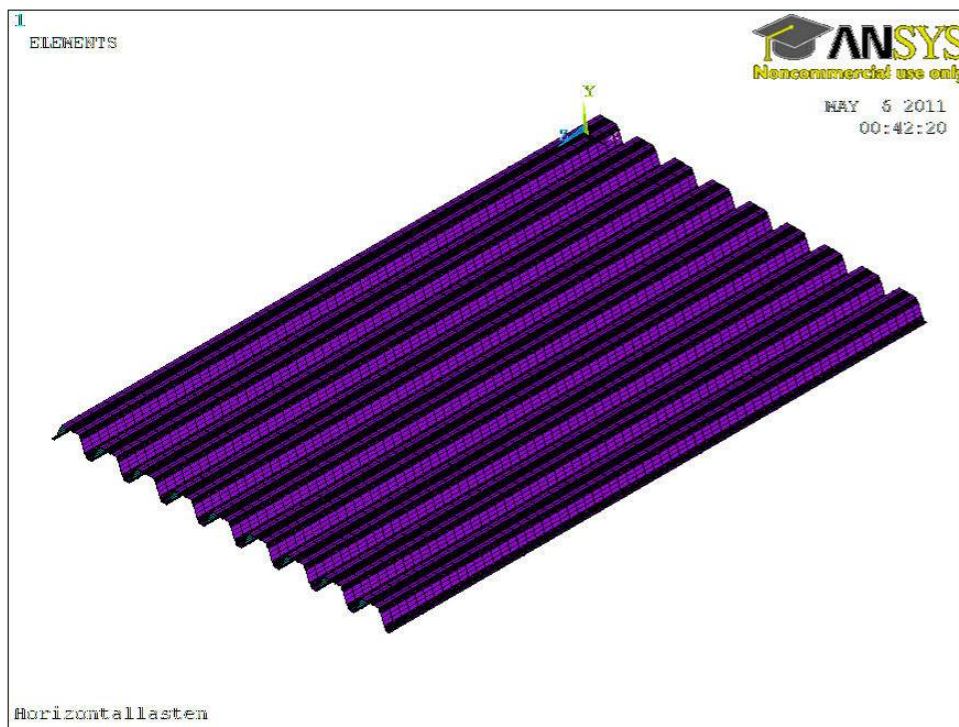
**Tabelle A.16: Ergebnisse der Zugversuche an Proben aus den Stahltrapezprofilen**



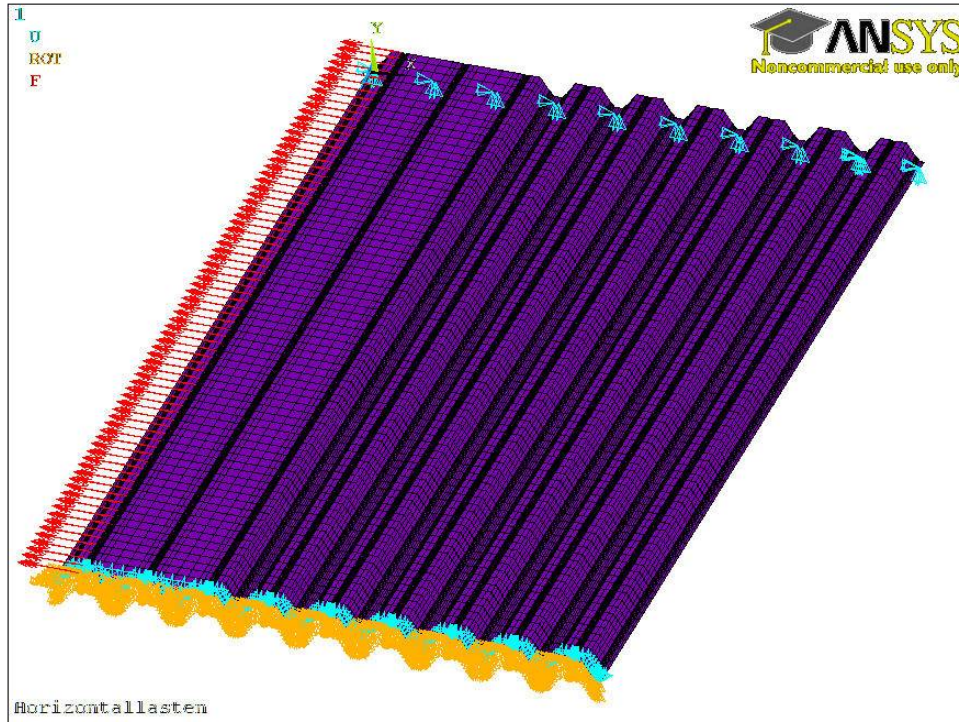
## **Anhang B: Finite-Element-Berechnungen**

Die Berechnungen wurden mit dem Finite-Elemente-Programm Ansys durchgeführt. Dabei wurde das 4-Knoten-Schalenelement 181 verwendet, das auf der Theorie schubelastischer Platten (Reissnersches Plattenmodell) basiert. Das Element besitzt Biege- und Membransteifigkeit. Die Knoten dieses Schalenelements besitzen jeweils drei Verschiebungs- und drei Rotationsfreiheitsgrade.

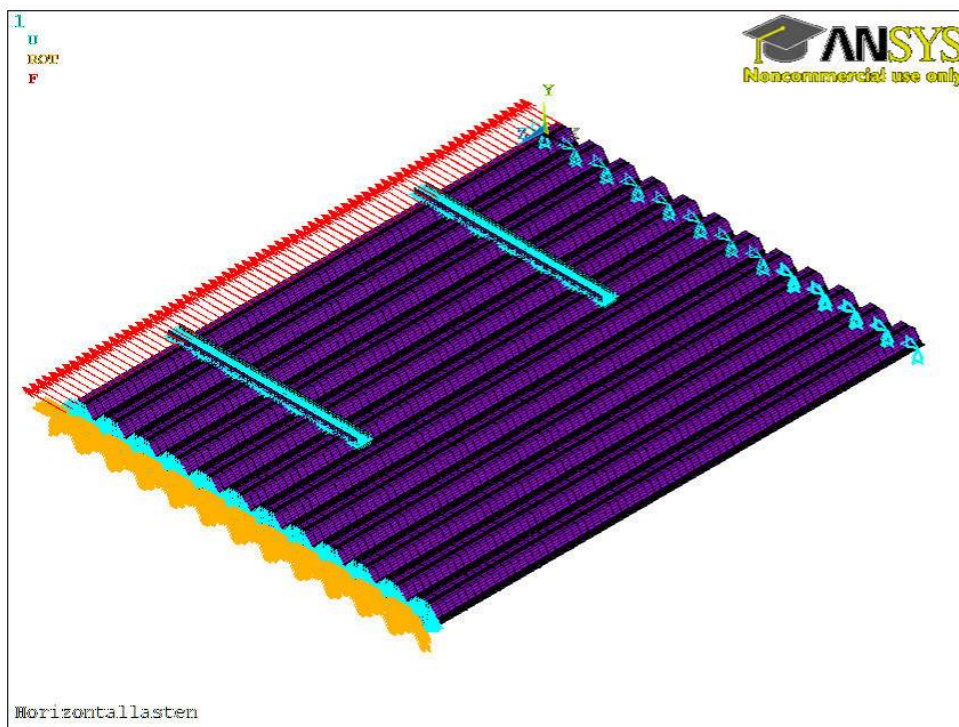
Die Flachbleche wurden als direkte Verbindung der Obergurte modelliert. Für geringe Beanspruchungen, bei denen es nicht zu einem Ausbeulen der Flachbleche kommt, entsprach dies näherungsweise der im Versuch vorgenommenen engen Befestigung der über die Rippen gelegten Flachblechtafeln mit Bohrschrauben. Die U-Profile wurden getrennt von den Trapezprofilen modelliert und anschließend über Kontaktelemente gekoppelt.



**Abbildung B.1: Abbildung B.2: System bei ungekoppelten Rippen**

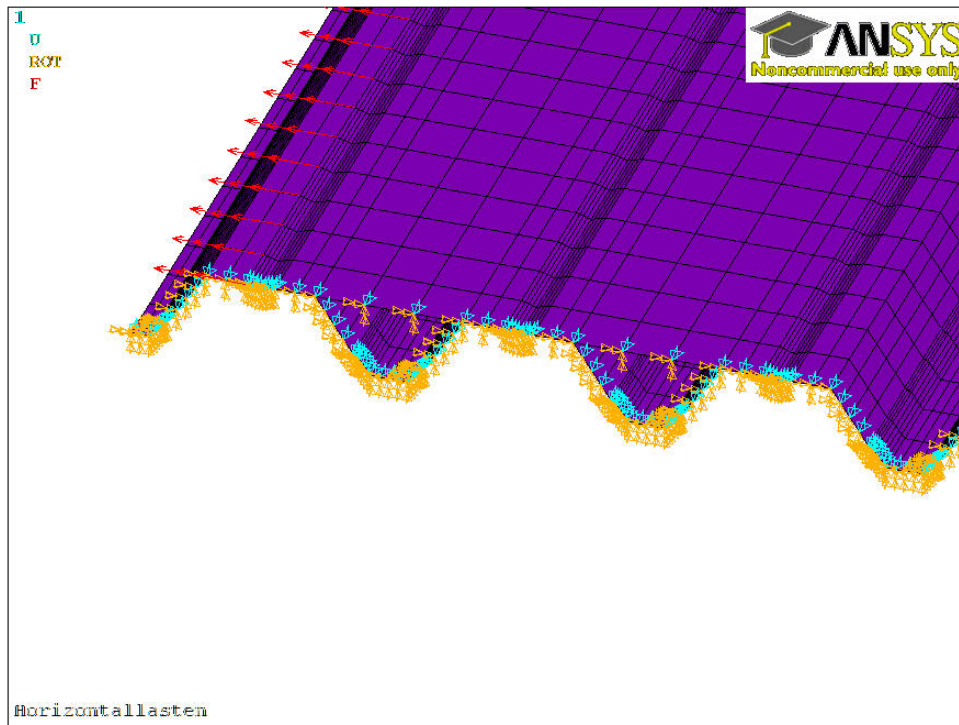


**Abbildung B.3: System bei Kopplung der Rippen über Flachbleche**



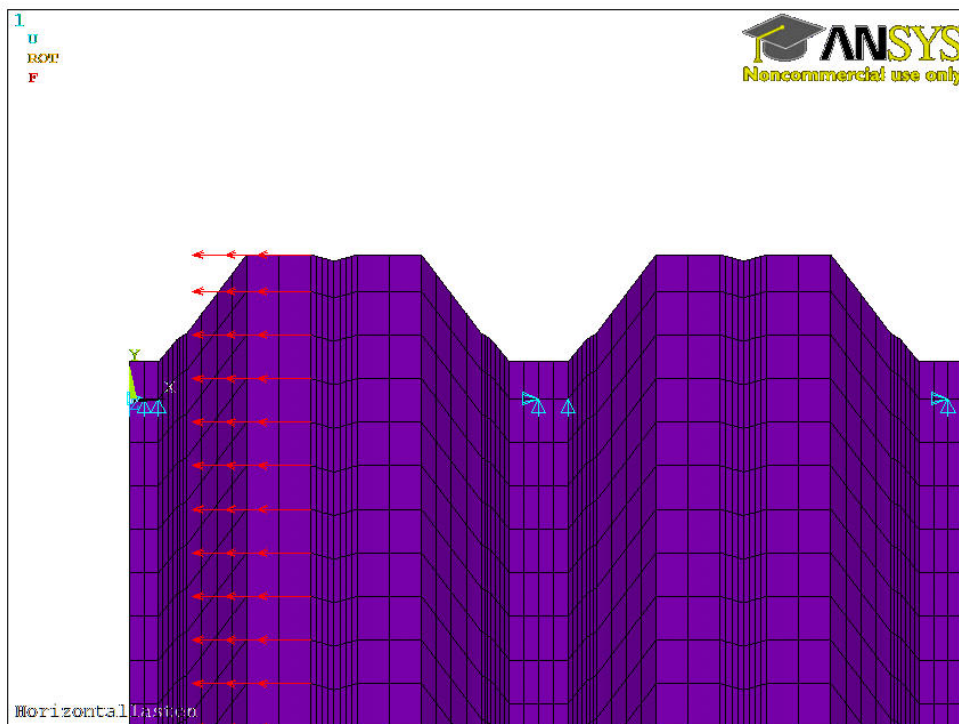
**Abbildung B.4: System bei Kopplung der Rippen über U-Profile**

Für die Ermittlung der Auflagerkräfte wurden Finite-Element-Berechnungen an einem Halbmodell durchgeführt. Die Symmetrierandbedingungen lagen in Feldmitte.



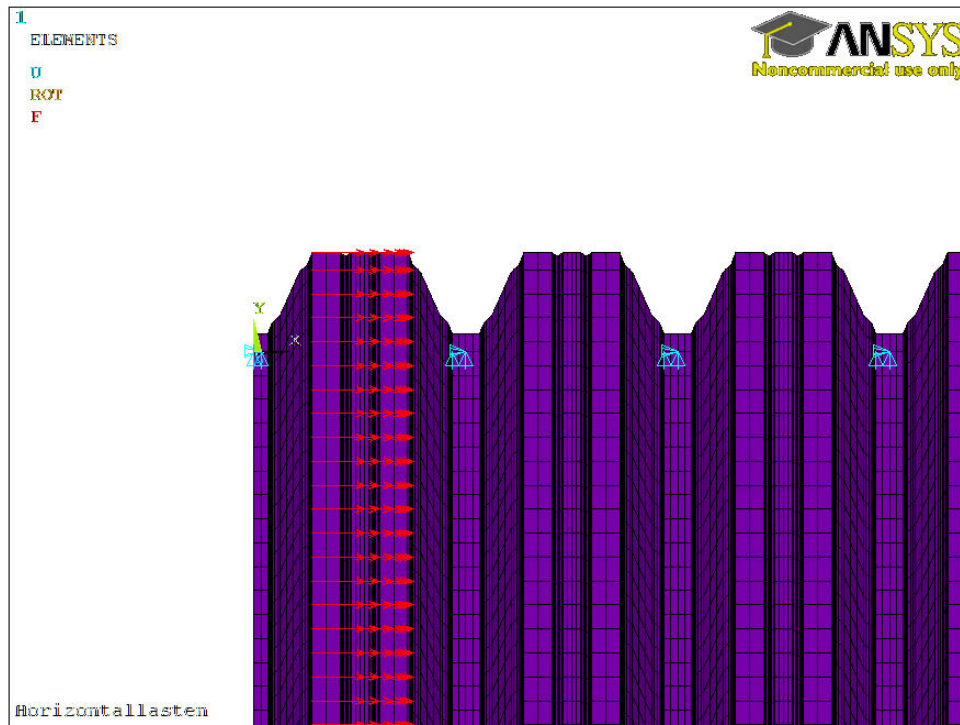
**Abbildung B.5: Symmetriebedingungen (hier beim System bei Kopplung der Rippen über Flachbleche)**

Die Auflagerkräfte wurden an einzelnen Knoten in der Auflagerlinie ermittelt, wobei die Auflager entsprechend der Belastungsrichtung gesetzt wurden.



**Abbildung B.6: Auflager bei Belastung in Richtung des freien Längsrandes**





**Abbildung B.7: Auflager bei Belastung in Richtung der Dachfläche**

Die Berechnungen wurden geometrisch linear mit linear-elastischem Werkstoffgesetz durchgeführt.